



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΙΓΑΙΟΥ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΚΩΝ ΚΑΙ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
Πληροφορικά & Επικοινωνιακά Συστήματα

Digital Herd Management tools

Ψηφιακά εργαλεία διαχείρισης κοπαδιού

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Της

Καλλιόπης Ζερβάκη

A.M: 3252024009

Επιβλέπων : Δρ Γ. Κορμέντζας

Σάμος, [Ιούνιος 2026]

Επιβλέπων:

Κορμέντζας Γεώργιος
Καθηγητής
Τμήμα Μηχανικών Πληροφοριακών και Επικοινωνιακών Συστημάτων

Μέλη εξεταστικής επιτροπής:

Σκούτας Δημήτριος
Αναπληρωτής Καθηγητής
Τμήμα Μηχανικών Πληροφοριακών και Επικοινωνιακών Συστημάτων

Σκιάνης Χαράλαμπος
Καθηγητής
Τμήμα Μηχανικών Πληροφοριακών και Επικοινωνιακών Συστημάτων

Σάμος, [Ιούνιος 2026]

Πρόλογος και ευχαριστίες

Ευχαριστώ θερμά τον καθηγητή μου κύριο Κορμέντζα για την καθοδήγηση που μου παρείχε σε όλη την διάρκεια της παρούσας διπλωματικής, τον σύζυγο μου Θοδωρή και τους γονείς μου για την στήριξη και την πολύτιμη βοήθεια τους.

© [2026]

της

Καλλιόπης Ζερβάκη

Τμήμα Μηχανικών Πληροφοριακών και Επικοινωνιακών Συστημάτων

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΙΓΑΙΟΥ

Πίνακας περιεχομένων

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή	1
1.1 Στόχοι και σκοπός της εργασίας	1
1.2 Ερευνητικά ερωτήματα και μεθοδολογική προσέγγιση	3
1.3 Δομή της εργασίας	3
Κεφάλαιο 2: Θεωρητικό Πλαίσιο	4
2.1 Η σημασία της διαχείρισης ζωικού κεφαλαίου	4
2.2 Ο ρόλος των δεδομένων και της τεχνολογίας στην αγροδιατροφή	5
2.3 Σύνδεση διαχείρισης ζωικού κεφαλαίου με βιωσιμότητα και κερδοφορία	6
2.4 Ευζωία και υγεία των ζώων	7
2.5 Οικονομικές διαστάσεις της διαχείρισης ζωικού κεφαλαίου	8
2.6 Σύνθετοι δείκτες αξιολόγησης και Herd Status Index (HSI)	9
Κεφάλαιο 3 Μεθοδολογία και Τεχνολογίες Διαχείρισης Ζωικού Κεφαλαίου	11
3.1 Τεχνολογικές εξελίξεις στη διαχείριση ζωικού κεφαλαίου	11
3.2 Εισαγωγή στην μεθοδολογία	12
3.3 Τεχνολογική υποδομή και αισθητήρες	13
3.4 Ανάλυση και ενοποίηση δεδομένων	15
3.5 Εφαρμογή και αξιολόγηση απόδοσης	17
3.6 Ενσωμάτωση τεχνητής νοημοσύνης, ρομποτικής και εικονικής πραγματικότητας	18
Κεφάλαιο 4: Τεχνολογία Digital Twins στην Διαχείριση Ζωικού Κεφαλαίου	21
4.1 Εισαγωγή	21
4.2 Εισαγωγή στα Digital Twins	21
4.3 Κύριες λειτουργίες και δομή	22
4.4 Τεχνολογίες και αρχιτεκτονική των Digital Twins	25
4.5 Παραδείγματα εφαρμογής	28
4.6 Σύγκριση με την παραδοσιακή κτηνοτροφία	29
Κεφάλαιο 5: Τεχνολογία VR στην Διαχείριση Ζωικού Κεφαλαίου	32
5.1 Εισαγωγή	32
5.2 Κύριες λειτουργίες και δομή	32
5.3 Παραδείγματα εφαρμογών	34
5.4 Σύγκριση με την παραδοσιακή κτηνοτροφία	36
Κεφάλαιο 6: Εφαρμογές Herd Management with Digital Twins	37
Κεφάλαιο 7: Συμπέρασμα και προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα	53
Βιβλιογραφία	54

Λίστα Σχημάτων

Σχήμα 1: Η βασική διαμόρφωση των στοιχείων του ψηφιακού διδύμου.	26
Σχήμα 2: Ψηφιακό δίδυμο με αρχιτεκτονική έξι επιπέδων.	27
Σχήμα 4: Εννοιολογικό πλαίσιο ενός ψηφιακού διδύμου για χοιροστάσιο.	44
Σχήμα 5: Ενεργειακή μοντελοποίηση μιας πραγματικής χοιροτροφικής μονάδας.	46
Σχήμα 6: Θερμικές ενεργειακές απαιτήσεις διαφορετικών συστημάτων HVAC.	47
Σχήμα 7: Σύγκριση των βέλτιστων και των συμβατικών προγραμμάτων λειτουργίας των ανεμιστήρων εξαερισμού.	48
Σχήμα 8: Κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας του ανεμιστήρα εξαερισμού για κάθε μέθοδο λειτουργίας.	49
Σχήμα 9: Σύστημα πάνελ ακτινοβολούμενης ψύξης και θέρμανσης εγκατεστημένο στον χοιροστάσιο.	50
Σχήμα 10: Βέλτιστο ωριαίο πρόγραμμα λειτουργίας της θερμοκρασίας νερού του πάνελ.	51
Σχήμα 11: Κατανάλωση ενέργειας για θέρμανση για κάθε περίπτωση.	52

Ακρωνύμια

DHI	Dairy Herd Improvement
HSI	Herd Status Index
IoT	Internet of Things
XR	Extended Reality
VR	Virtual Reality
PLF	Precision Livestock Farming
AI	Artificial Intelligence
RFID	Radio Frequency Identification
FSI	Farm Sustainability Indicators
EPI	Environmental Performance Index
ASPI	Agro-System Performance Index
MCA	Multi-Criteria Analysis
PCA	Principal Component Analysis
MQTT	Message Queuing Telemetry Transport
LoRaWAN	Long Range Wan
SVM	Support Vector Machines
CNNs	Convolutional Neural Networks
RNNs	Recurrent Neural Networks
CPS	Cyber-Physical System
KPIs	Key Performance Indicators
ROI	Return on Investment
FMS	Farm Management System
CNNs	Convolutional Neural Networks
RL	Reinforcement Learning
HMDs	Head-Mounted Displays
GUI	Graphical user interface
UWB	Ultra wideband
IMUs	Inertial Measurement Units
LSTM	Long short-term memory
BES	Building Energy Simulations
HRP	Heating Radiant Panel

Περίληψη

Η διαχείριση και παρακολούθηση της κατάστασης των μονάδων ζωικού κεφαλαίου, αποτελεί βασικό παράγοντα για την υγεία, την ευζωία και την παραγωγικότητα των ζώων, είναι όμως και χρονοβόρες καθώς απαιτούν σημαντικούς πόρους, γεγονός που δυσχεραίνει τη συστηματική παρακολούθηση. Τα Herd Management Tools είναι σύγχρονα εργαλεία βασισμένα σε καθημερινά δεδομένα, όπως οι καταγραφές από το Dairy Herd Improvement (DHI), επιτρέπουν τη συγκέντρωση και ανάλυση πληροφοριών σχετικά με την αναπαραγωγή, τη διατροφή, την παραγωγή, τη διαχείριση νεαρών ζώων, την υγεία και την κερδοφορία. Η χρήση αυτών των δεδομένων οδήγησε στην ανάπτυξη σύνθετων δεικτών, όπως ο Herd Status Index (HSI), που επιτρέπει τη συνολική αξιολόγηση του ζωικού κεφαλαίου, την ανίχνευση περιοχών που χρειάζονται βελτίωση και τη συγκριτική αξιολόγηση με άλλα κοπάδια.

Η χρήση Herd Management Tools με τεχνολογία Digital Twins επιτρέπει τη δημιουργία ψηφιακών, δυναμικών μοντέλων ζωικού κεφαλαίου, όπου οι αλλαγές σε πραγματικό χρόνο καταγράφονται, αναλύονται και εφαρμόζονται σε εικονικό ή πραγματικό περιβάλλον. Τα Digital Twins μετασχηματίζουν αυτή τη διαδικασία, δημιουργώντας ψηφιακές αναπαραστάσεις του ζωικού κεφαλαίου, που ενημερώνονται συνεχώς με δεδομένα από αισθητήρες, κάμερες και συστήματα Internet of things (IoT). Η τεχνολογία αυτή επιτρέπει πρόβλεψη ασθενειών, βελτιστοποίηση διατροφής, αύξηση παραγωγικότητας και καλύτερη ευζωία ζώων.

Παράλληλα, η εκπαιδευτική εμπειρία με εικονικές μονάδες έχει δείξει ότι οι φοιτητές και οι επαγγελματίες μπορούν να κατανοήσουν σε βάθος τη λειτουργία ενός ζωικού κεφαλαίου μέσω ενεργητικής μάθησης. Μέσω προγραμμάτων προσομοίωσης οι φοιτητές/επαγγελματίες λαμβάνουν αποφάσεις σχετικά με τεχνητή σπερματέγχυση, ανίχνευση θερμότητας, διατροφικές ρυθμίσεις, απογαλακτισμό και θεραπεία ασθενειών, ενώ τα αποτελέσματα ανατροφοδοτούνται μέσω τεχνικών και οικονομικών δεικτών. Συνδυάζοντας την αξιοποίηση των δεδομένων με τις προσομοιώσεις, δημιουργείται ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο που επιτρέπει τόσο στους παραγωγούς όσο και στους συμβούλους να εντοπίζουν έγκαιρα τα κοπάδια που χρειάζονται υποστήριξη, να εφαρμόζουν βέλτιστες πρακτικές και να παρακολουθούν την αποτελεσματικότητα των παρεμβάσεων. Επιπλέον, οι φοιτητές αποκτούν βιωματική εμπειρία, ενισχύοντας τη γνώση τους στη διαχείριση, την υγεία και την ευζωία των ζώων. Συνολικά, η προσέγγιση αυτή συμβάλλει στη βελτίωση της βιωσιμότητας, της αποδοτικότητας και της ποιότητας της γαλακτοπαραγωγικής εκτροφής.

Λέξεις Κλειδιά: Herd Management Tools, Digital Twins

Abstract

Effective monitoring and management of dairy herds is essential for maintaining animal health, welfare, and productivity. Traditional on-farm assessments are often time-consuming and resource-intensive, making regular monitoring challenging. Herd Management Tools are modern tools that use routine data, such as Dairy Herd Improvement (DHI) records, to collect and analyze information on reproduction information on reproduction, nutrition, milk production, young stock management, health, and profitability. These data can be combined into composite indicators, such as the Herd Status Index (HSI), which provides an overall assessment of herd condition, helps identify areas needing improvement, and enables comparison with other herds.

The use of Herd Management Tools combined with Digital Twin technology enables the creation of digital, dynamic models of livestock, where real-time changes are recorded, analyzed, and applied in either virtual or real-world environments. Digital Twins transform this process by creating digital representations of livestock that are continuously updated with data from sensors, cameras, and Internet of Things (IoT) systems. This technology enables disease prediction, feed optimization, increased productivity, and improved animal welfare.

At the same time, virtual dairy farm simulations have proven to be effective educational tools, helping students and professionals better understand herd structure and management through active learning. In these simulations, students/professionals make decisions about heat detection, artificial insemination, diet management, weaning, disease treatment, and other management practices. By combining the use of routine herd data with virtual simulations, a comprehensive framework is created that allows both producers and advisors to quickly identify herds needing support, apply better management practices, and monitor the effectiveness of interventions. Simultaneously, students gain hands-on experience, deepening their understanding of herd health, welfare, and management. Overall, this approach contributes to improved sustainability, efficiency, and animal welfare in dairy farming.

Keywords: Herd Management Tools, Digital Twins

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

1.1 Στόχοι και σκοπός της εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία επικεντρώνεται στη μελέτη και αξιολόγηση των herd management tools, δηλαδή των εργαλείων που χρησιμοποιούνται για τη συστηματική παρακολούθηση και βελτίωση της διαχείρισης ζωικού κεφαλαίου σε φάρμες. Η αποτελεσματική διαχείριση ενός ζωικού κεφαλαίου αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για την αποδοτικότητα και τη βιωσιμότητα μιας κτηνοτροφικής εκμετάλλευσης, καθώς επηρεάζει τη γαλακτοπαραγωγή, την υγεία και την ευζωία των ζώων, την αναπαραγωγική τους ικανότητα αλλά και την κερδοφορία της μονάδας. Σε ένα περιβάλλον όπου οι απαιτήσεις της αγοράς αυξάνονται και οι διαθέσιμοι πόροι είναι περιορισμένοι, η ανάγκη αξιοποίησης επιστημονικών και τεχνολογικών εργαλείων για την έγκαιρη διάγνωση προβλημάτων και τη λήψη ορθολογικών αποφάσεων καθίσταται ολοένα και πιο επιτακτική.

Ο βασικός σκοπός της εργασίας είναι να αναδείξει πώς τα σύγχρονα εργαλεία διαχείρισης ζωικού κεφαλαίου σε φάρμες συμβάλλουν στη βελτίωση της παραγωγικότητας, της ευζωίας και της οικονομικής απόδοσης των εκτροφών. Μέσα από τη μελέτη της διεθνούς βιβλιογραφίας επιχειρείται να αναδειχθεί η πορεία ανάπτυξης και η πρακτική χρήση των εργαλείων herd management, με έμφαση στην αξιοποίηση των δεδομένων που συλλέγονται καθημερινά στις κτηνοτροφικές μονάδες. Ιδιαίτερη θέση κατέχει το Herd Status Index (HSI), ένα σύνθετο εργαλείο που συνδυάζει πολλαπλούς δείκτες και επιχειρεί να αποτυπώσει συνολικά την κατάσταση ενός ζωικού κεφαλαίου. Με την παρουσίαση και ανάλυση τέτοιων προσεγγίσεων, στόχος είναι να διερευνηθούν οι δυνατότητες που προσφέρουν αλλά και οι περιορισμοί που υπάρχουν.

Η συνολική διαχείριση ενός ζωικού κεφαλαίου αποτελεί έναν από τους πιο σύνθετους τομείς της σύγχρονης αγροτικής παραγωγής σε φάρμες, επηρεάζει την υγεία και ευζωία των ζώων, την αναπαραγωγική τους ικανότητα, την παραγωγικότητα και την οικονομική αποδοτικότητα (Warner et al., 2020). Η συνεχής παρακολούθηση των παραμέτρων αυτών είναι απαραίτητη για την πρόληψη προβλημάτων και τη βελτιστοποίηση της απόδοσης, αλλά η συλλογή μετρήσεων σε επίπεδο ζώου είναι χρονοβόρα και δαπανηρή. Η αξιοποίηση των δεδομένων που συλλέγονται στα πλαίσια της καθημερινής διαχείρισης όπως στοιχεία γονιμότητας, παραγωγής γάλακτος, υγείας και ευζωίας προσφέρει μια αποδοτική λύση για τη συνεχή αξιολόγηση της κατάστασης του ζωικού κεφαλαίου. Μέσω σύνθετων δεικτών, όπως ο Herd Status Index (HSI), είναι δυνατή η συγκριτική αξιολόγηση του ζωικού κεφαλαίου, η αναγνώριση αδυναμιών και η προτεραιοποίηση παρεμβάσεων. [1]

Παράλληλα, το ενδιαφέρον του κοινού για την προέλευση των τροφίμων, την ηθική παραγωγή και την περιβαλλοντική επίδραση αυξάνεται σημαντικά. Ωστόσο, οι καταναλωτές συχνά δεν έχουν άμεση επαφή με τη φάρμα και δεν γνωρίζουν πώς παράγονται τα προϊόντα που καταναλώνουν. Σε αυτό το πλαίσιο, η χρήση τεχνολογιών εικονικής πραγματικότητας - Virtual Reality (VR) και επαυξημένης πραγματικότητας - Extended Reality (XR) έχει αναδειχθεί ως αποτελεσματική μέθοδος για την παροχή εκπαιδευτικών και ενημερωτικών εμπειριών. Μέσα από VR εφαρμογές, το κοινό μπορεί να περιηγηθεί σε φάρμες, να παρακολουθήσει διαδικασίες όπως η σίτιση, η αναπαραγωγή και η διαχείριση της υγείας των ζώων, και να κατανοήσει την πολυπλοκότητα της διαχείρισης ζωικού κεφαλαίου χωρίς φυσική παρουσία στον χώρο. Επιπλέον, τέτοιες προσομοιώσεις ενισχύουν την ενεργητική μάθηση, προωθούν τη διαφάνεια και γεφυρώνουν το κενό γνώσης και εμπιστοσύνης μεταξύ κοινού και βιομηχανίας. Μπορεί να δημιουργήσει ισχυρή σύνδεση με το κοινό μέσω καθηλωτικών και διαδραστικών εικονικών εμπειριών, προσφέροντας επαληθεύσιμες καταστάσεις για τη διαμόρφωση γνώμης.

Η συνδυαστική αξιοποίηση των καθημερινών δεδομένων του ζωικού κεφαλαίου με διαδραστικές VR εφαρμογές επιτρέπει την ανάπτυξη ολοκληρωμένων εργαλείων διαχείρισης. Αυτά τα εργαλεία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για benchmarking, αξιολόγηση ευζωίας, βελτιστοποίηση διατροφής, καθώς και εκπαίδευση φοιτητών και παραγωγών για τις βέλτιστες πρακτικές στη γαλακτοπαραγωγή. Παράλληλα, οι VR εφαρμογές επιτρέπουν στο κοινό να αλληλεπιδράσει με τα δεδομένα σε πραγματικό χρόνο, κατανοώντας τις συνέπειες των διαχειριστικών αποφάσεων και ενισχύοντας τη μάθηση και την ενημέρωση. [2,3]

1.2 Ερευνητικά ερωτήματα και μεθοδολογική προσέγγιση

Η εργασία επιχειρεί να απαντήσει σε ορισμένα καίρια ερωτήματα που συνδέονται με τη σύγχρονη διαχείριση ζωικού κεφαλαίου σε φάρμες. Αρχικά, επιδιώκεται να αποσαφηνιστεί ποια είναι τα κυριότερα εργαλεία herd management που εφαρμόζονται διεθνώς και με ποιον τρόπο αυτά επηρεάζουν την υγεία, την αναπαραγωγή και την κερδοφορία του ζωικού κεφαλαίου. Παράλληλα, εξετάζεται ο τρόπος με τον οποίο τα δεδομένα που καταγράφονται συστηματικά, όπως εκείνα των προγραμμάτων Dairy Herd Improvement (DHI), μπορούν να αξιοποιηθούν για τη δημιουργία δεικτών που επιτρέπουν μια πιο ολοκληρωμένη και αντικειμενική αξιολόγηση. Επιπλέον, τίθεται το ερώτημα ποιες προοπτικές και ποιες προκλήσεις αναδύονται για την εφαρμογή των εργαλείων αυτών στην ελληνική πραγματικότητα, όπου κυριαρχούν οι μικρομεσαίες εκμεταλλεύσεις και ταυτόχρονα υπάρχει πίεση για αύξηση της παραγωγικότητας και συμμόρφωση με αυστηρότερα πρότυπα ευζωίας και ποιότητας.

Η μεθοδολογική προσέγγιση που υιοθετείται βασίζεται κυρίως στη βιβλιογραφική επισκόπηση. Αναλύονται επιστημονικές δημοσιεύσεις, μελέτες περίπτωσης και διεθνείς πρακτικές, προκειμένου να εντοπιστούν οι κυρίαρχες τάσεις, να καταγραφούν οι διαφορές μεταξύ των χωρών και να αναδειχθούν τα σημεία που χρήζουν περαιτέρω ερευνητικής διερεύνησης. Η σύγκριση των πορισμάτων αυτών επιτρέπει τη διαμόρφωση μιας πιο σφαιρικής εικόνας για τον ρόλο και την αποτελεσματικότητα των herd management tools.

1.3 Δομή της εργασίας

Η εργασία είναι οργανωμένη με τρόπο που να αναδεικνύει σταδιακά το θεωρητικό και πρακτικό υπόβαθρο του θέματος. Στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι στόχοι, τα ερευνητικά ερωτήματα και η γενική μεθοδολογική κατεύθυνση. Το δεύτερο κεφάλαιο εστιάζει στο θεωρητικό πλαίσιο, όπου αναλύεται η σημασία της διαχείρισης ζωικού κεφαλαίου, ο ρόλος της τεχνολογίας στην κτηνοτροφία και η σύνδεση της σωστής διαχείρισης με την ευζωία και τη βιωσιμότητα. Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζονται διεξοδικά οι τεχνολογικές εξελίξεις, οι πρακτικές benchmarking, οι δείκτες ευζωίας και υγείας, οι οικονομικές διαστάσεις της διαχείρισης και το Herd Status Index. Το τέταρτο κεφάλαιο επικεντρώνεται στην ανάλυση της τεχνολογίας Digital Twins και πώς μπορεί να συνδυαστεί με την διαχείριση ζωικού κεφαλαίου, το πέμπτο κεφάλαιο αναλύει την τεχνολογία VR, το έκτο κάνει βιβλιογραφική επισκόπηση για τις εφαρμογές Herd Management with Digital Twins και το έβδομο κεφάλαιο συνοψίζει τα κύρια συμπεράσματα και προτείνει κατευθύνσεις για μελλοντική έρευνα.

Κεφάλαιο 2: Θεωρητικό Πλαίσιο

2.1 Η σημασία της διαχείρισης ζωικού κεφαλαίου

Η διαχείριση ζωικού κεφαλαίου στη γαλακτοπαραγωγική κτηνοτροφία αποτελεί έναν από τους βασικότερους παράγοντες που καθορίζουν τη βιωσιμότητα, την αποδοτικότητα και την ανθεκτικότητα των εκμεταλλεύσεων. Τα τελευταία χρόνια, η παγκόσμια ζήτηση για γαλακτοκομικά προϊόντα αυξάνεται σταθερά, γεγονός που επιβάλλει τη βελτιστοποίηση όλων των σταδίων της παραγωγικής διαδικασίας. Σε αυτό το πλαίσιο, η σωστή διαχείριση του ζωικού κεφαλαίου δεν αφορά μόνο την επίτευξη υψηλότερης παραγωγής γάλακτος, αλλά και τη διασφάλιση της ευζωίας των ζώων, την αποτελεσματική χρήση των πόρων, τη μείωση των εκπομπών και την οικονομική σταθερότητα του παραγωγού.

Η μετάβαση από τις μικρές οικογενειακές φάρμες στις μεγάλες εντατικές μονάδες δημιούργησε νέες ανάγκες και προκλήσεις. Οι παραγωγοί πλέον δεν μπορούν να παρακολουθούν προσωπικά κάθε ζώο, όπως συνέβαινε στο παρελθόν, αλλά πρέπει να βασίζονται σε οργανωμένα συστήματα ελέγχου και παρακολούθησης. Η αύξηση του μεγέθους των κοπαδιών έχει φέρει στην επιφάνεια ζητήματα που σχετίζονται με την αποδοτικότητα της διατροφής, τη διαχείριση ασθενειών, τη γενετική βελτίωση και τη βελτιστοποίηση της αναπαραγωγής. Σύμφωνα με τους Hogeveen et al. (2019), η έλλειψη οργανωμένων διαδικασιών αυξάνει τον κίνδυνο λαθών και μειώνει την οικονομική βιωσιμότητα, ενώ η εφαρμογή προτύπων συστημάτων διαχείρισης μειώνει τα λειτουργικά κόστη και αυξάνει την απόδοση. [4]

Η έννοια της «ολιστικής διαχείρισης» (integrated management) τονίζει τη σημασία του συντονισμού όλων των τομέων της παραγωγής — υγεία, αναπαραγωγή, διατροφή, περιβάλλον, παραγωγή γάλακτος — σε ένα ενιαίο σύστημα. Οι σύγχρονες φάρμες που λειτουργούν με βάση αυτά τα πρότυπα εμφανίζουν καλύτερους δείκτες παραγωγικότητας, μικρότερο ποσοστό ασθενειών και υψηλότερα επίπεδα ευζωίας των ζώων. Επιπλέον, η σωστή διαχείριση συμβάλλει στην ενίσχυση της εμπιστοσύνης των καταναλωτών. Η ζήτηση για προϊόντα που παράγονται με διαφανείς και ηθικές πρακτικές αυξάνεται διαρκώς, καθώς οι πολίτες επιθυμούν να γνωρίζουν την προέλευση των τροφίμων τους και τις συνθήκες εκτροφής των ζώων. Επομένως, η διαχείριση του ζωικού κεφαλαίου δεν αποτελεί μόνο εσωτερική ανάγκη της εκμετάλλευσης αλλά και στρατηγικό εργαλείο επικοινωνίας με την αγορά. [5]

Τέλος, η κλιματική αλλαγή ενισχύει ακόμη περισσότερο τη σημασία της σωστής διαχείρισης. Οι ακραίες θερμοκρασίες, η μειωμένη διαθεσιμότητα ζωοτροφών και οι μεταβολές στα μοτίβα ασθενειών απαιτούν προσαρμοστικά μοντέλα εκτροφής. Η ενσωμάτωση συστημάτων που καταγράφουν δεδομένα για το μικροκλίμα, την υγεία και τη συμπεριφορά των ζώων επιτρέπει την έγκαιρη πρόληψη και την ανθεκτικότητα των φαρμών απέναντι στις νέες προκλήσεις.

2.2 Ο ρόλος των δεδομένων και της τεχνολογίας στην αγροδιατροφή

Η είσοδος της ψηφιακής τεχνολογίας στην αγροδιατροφή έχει αλλάξει ριζικά το παραδοσιακό μοντέλο παραγωγής. Η τεχνολογία ακριβείας Precision Livestock Farming (PLF) προσφέρει τη δυνατότητα συνεχούς συλλογής και ανάλυσης δεδομένων, με στόχο τη βελτιστοποίηση της παραγωγής, τη μείωση του κόστους και τη βελτίωση της ευζωίας. Οι αισθητήρες που εφαρμόζονται στο σώμα των ζώων, στα αρμεκτήρια και στους χώρους διαβίωσης επιτρέπουν την αυτόματη παρακολούθηση ζωτικών παραμέτρων, όπως η καρδιακή συχνότητα, η κατανάλωση τροφής, η κίνηση και η παραγωγή γάλακτος. [6]

Η συγκέντρωση αυτών των δεδομένων επιτρέπει τη δημιουργία «έξυπνων φαρμών», όπου η λήψη αποφάσεων βασίζεται σε πραγματικά στοιχεία και όχι σε υποκειμενική εμπειρία. Τα δεδομένα αναλύονται με εργαλεία Big Data και τεχνητής νοημοσύνης Artificial Intelligence (AI), που εντοπίζουν πρότυπα και συσχετίσεις που δεν είναι αντιληπτές από τον άνθρωπο. Έτσι, μπορούν να προβλέψουν πιθανές ασθένειες ή μεταβολές στην παραγωγή πριν αυτές εκδηλωθούν, προσφέροντας στους παραγωγούς σημαντικό πλεονέκτημα. [7]

Η χρήση ψηφιακών συστημάτων φέρνει επίσης επανάσταση στην ιχνηλασιμότητα. Μέσω ολοκληρωμένων πλατφορμών διαχείρισης, κάθε στάδιο της παραγωγής από τη διατροφή μέχρι τη διανομή καταγράφεται ηλεκτρονικά. Έτσι, εξασφαλίζεται η ασφάλεια των τροφίμων και η συμμόρφωση με τα πρότυπα της Ευρωπαϊκής Ένωσης για την ποιότητα και την ασφάλεια των ζωικών προϊόντων.

Παράλληλα, η εφαρμογή τεχνολογιών όπως οι αισθητήρες (wearables), τα συστήματα RFID, και οι έξυπνες κάμερες επιτρέπει την ατομική παρακολούθηση κάθε ζώου, οδηγώντας σε βελτίωση της αναπαραγωγής και της υγείας. Η ανάλυση δεδομένων συμβάλλει και στη λήψη στρατηγικών αποφάσεων, όπως η επιλογή ζώων για αναπαραγωγή ή η αντικατάσταση μη παραγωγικών αγελάδων. [8]

Ωστόσο, η τεχνολογική μετάβαση συνοδεύεται από προκλήσεις. Το κόστος εγκατάστασης, η ανάγκη τεχνικής κατάρτισης και η έλλειψη υποδομών σε ορισμένες περιοχές περιορίζουν την ταχύτητα υιοθέτησης. Για αυτόν τον λόγο, αρκετές μελέτες προτείνουν τη δημιουργία συνεργατικών δικτύων και κέντρων υποστήριξης ψηφιακής κτηνοτροφίας που θα παρέχουν τεχνική βοήθεια και εκπαίδευση σε μικρομεσαίους παραγωγούς. [9]

2.3 Σύνδεση διαχείρισης ζωικού κεφαλαίου με βιωσιμότητα και κερδοφορία

Η διαχείριση ζωικού κεφαλαίου δεν περιορίζεται στη βελτίωση των παραγωγικών δεικτών αλλά αποτελεί ταυτόχρονα εργαλείο ενίσχυσης της ευζωίας, της βιωσιμότητας και της οικονομικής αποδοτικότητας. Η ευζωία των ζώων έχει αποδειχθεί ότι συνδέεται άμεσα με την απόδοση, καθώς ζώα που ζουν σε κατάλληλες συνθήκες παρουσιάζουν μικρότερη νοσηρότητα, υψηλότερη παραγωγή γάλακτος και μεγαλύτερη διάρκεια ζωής.

Η βιωσιμότητα αφορά τη μακροχρόνια ικανότητα μιας φάρμας να λειτουργεί χωρίς να εξαντλεί τους φυσικούς πόρους ή να επιβαρύνει υπέρμετρα το περιβάλλον. Οι σύγχρονες τεχνολογίες επιτρέπουν την καλύτερη διαχείριση ζωοτροφών, την εξοικονόμηση νερού και ενέργειας, καθώς και τη μείωση των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου. Οι φάρμες που επενδύουν σε βιώσιμες πρακτικές έχουν μακροπρόθεσμα καλύτερη οικονομική σταθερότητα και απολαμβάνουν θετικότερη κοινωνική εικόνα.

Στην πράξη, η εφαρμογή σύνθετων δεικτών ευζωίας και βιωσιμότητας (όπως ο Herd Status Index – HSI) βοηθά στην αξιολόγηση της συνολικής κατάστασης του ζωικού κεφαλαίου. Ο δείκτης HSI, που αναπτύχθηκε από τους Warner et al. (2020), βασίζεται σε 13 επιμέρους παραμέτρους που καλύπτουν την αναπαραγωγή, τη διατροφή, την υγεία, τη μακροβιότητα και την κερδοφορία. Μέσω αυτού, οι φάρμες μπορούν να συγκρίνουν τις επιδόσεις τους με άλλες παρόμοιες εκμεταλλεύσεις, να εντοπίζουν αδυναμίες και να σχεδιάζουν διορθωτικές παρεμβάσεις. [1]

2.4 Ευζωία και υγεία των ζώων

Η έννοια της ευζωίας των ζώων έχει εξελιχθεί τα τελευταία χρόνια σε κεντρικό άξονα της βιώσιμης κτηνοτροφίας. Δεν αφορά πλέον μόνο την απουσία ασθένειας ή πόνου, αλλά ένα σύνολο παραμέτρων που περιλαμβάνει τη σωματική υγεία, τη συμπεριφορά, το περιβάλλον διαβίωσης και τη συναισθηματική κατάσταση των ζώων. Η διασφάλιση υψηλών προτύπων ευζωίας συνδέεται στενά με την παραγωγικότητα, την ποιότητα του παραγόμενου γάλακτος και το κοινωνικό κύρος των εκμεταλλεύσεων.

Η τεχνολογία Precision Livestock Farming (PLF) έχει καταστήσει δυνατή την αντικειμενική παρακολούθηση της ευζωίας, μετατρέποντας υποκειμενικές παρατηρήσεις σε μετρήσιμα δεδομένα. Αισθητήρες που καταγράφουν δραστηριότητα, μηρυκασμό, θερμοκρασία σώματος και κινήσεις παρέχουν πληροφορίες σε πραγματικό χρόνο για την κατάσταση των ζώων. Για παράδειγμα, μια αιφνίδια μείωση της δραστηριότητας ή των κινήσεων μπορεί να υποδηλώνει ασθένεια ή χωλότητα, ενώ αλλαγές στο πρότυπο μηρυκασμού συχνά προηγούνται της εμφάνισης μεταβολικών προβλημάτων. [10]

Σημαντικό ρόλο διαδραματίζουν οι αισθητήρες που φοριούνται (π.χ. κολάρα) και οι αισθητήρες ενδοστομαχικού τύπου (rumen bolus), που μετρούν παραμέτρους όπως pH και θερμοκρασία. Η παρακολούθηση αυτών των δεικτών επιτρέπει την πρόωρη ανίχνευση πεπτικών ή μεταβολικών διαταραχών, βελτιώνοντας τον χρόνο αντίδρασης του παραγωγού.

Η τεχνολογία PLF παρέχει επίσης εργαλεία για την αξιολόγηση δεικτών ευζωίας σε επίπεδο του ζωικού κεφαλαίου. Στο πλαίσιο προγραμμάτων όπως το Welfare Quality®, οι αισθητήρες παρέχουν αντικειμενικά δεδομένα για την ανίχνευση παθήσεων, την παρακολούθηση της συμπεριφοράς και την αξιολόγηση της ποιότητας του περιβάλλοντος. Αυτή η προσέγγιση επιτρέπει τη σύγκριση διαφορετικών φαρμών και την προώθηση πρακτικών βελτίωσης μέσω benchmarking. [11]

Επιπλέον, η ευζωία των ζώων αποτελεί και παράγοντα κοινωνικής αποδοχής. Οι καταναλωτές ζητούν διαφάνεια και πιστοποίηση ότι τα ζώα ζουν σε ανθρώπινες συνθήκες. Η δυνατότητα μιας φάρμας να παρουσιάζει τεκμηριωμένα δεδομένα ευζωίας μπορεί να ενισχύσει την εμπιστοσύνη του κοινού και να βελτιώσει την εμπορική αξία των προϊόντων της.

Συνολικά, η ενσωμάτωση των τεχνολογικών εργαλείων στη διαχείριση της ευζωίας μεταμορφώνει τον τρόπο με τον οποίο αντιλαμβανόμαστε την υγεία των ζώων. Από την παραδοσιακή παρακολούθηση βασισμένη στη χειρωνακτική παρατήρηση, περνάμε σε ένα δυναμικό και συνεχές σύστημα ανάλυσης, που προάγει την πρόληψη, βελτιώνει την παραγωγικότητα και ενισχύει την ανταγωνιστικότητα του κλάδου.

2.5 Οικονομικές διαστάσεις της διαχείρισης ζωικού κεφαλαίου

Η οικονομική διάσταση της διαχείρισης ζωικού κεφαλαίου αποτελεί θεμελιώδη παράγοντα για τη βιωσιμότητα των κτηνοτροφικών εκμεταλλεύσεων. Η εφαρμογή σύγχρονων τεχνολογιών όπως τα συστήματα Precision Livestock Farming (PLF) δεν επηρεάζει μόνο τη βιολογική απόδοση των ζώων αλλά και την οικονομική αποδοτικότητα της παραγωγής. Η οικονομική αξιολόγηση βασίζεται στη σχέση μεταξύ κόστους επένδυσης, αποδοτικότητας και κέρδους ανά ζώο ή ανά μονάδα παραγωγής.

Η οικονομική ανάλυση στη διαχείριση ζωικού κεφαλαίου πρέπει να λαμβάνει υπόψη όχι μόνο το άμεσο κόστος αγοράς εξοπλισμού αλλά και το μακροπρόθεσμο όφελος που προκύπτει από την αύξηση της παραγωγικότητας και τη μείωση των ασθενειών. Η αυτοματοποιημένη παρακολούθηση μειώνει την ανάγκη χειρωνακτικής εργασίας και βελτιώνει την αποδοτικότητα χρονισμού στις παρεμβάσεις υγείας.

Η οικονομική ανάλυση συνδέεται στενά και με τη διαχείριση ευζωίας. Κοπάδια με καλύτερη υγεία και χαμηλότερα ποσοστά στρες παρουσιάζουν μεγαλύτερη παραγωγική διάρκεια και χαμηλότερο κόστος θεραπείας. Έρευνα έδειξε ότι οι φάρμες που επενδύουν στην ευζωία των ζώων εξοικονομούν σημαντικά ποσά λόγω μειωμένων απωλειών παραγωγής και βελτιωμένης ποιότητας γάλακτος. [12]

Οι τεχνολογίες αισθητήρων συμβάλλουν επίσης στη δημιουργία οικονομικών δεικτών πραγματικού χρόνου, επιτρέποντας την παρακολούθηση της κερδοφορίας σε επίπεδο ζώου. Για παράδειγμα, το Herd Status Index (HSI) ενσωματώνει δείκτες παραγωγής, αναπαραγωγής, ευζωίας και οικονομικής απόδοσης ώστε να παρέχει μια ολιστική εικόνα της εκμετάλλευσης. Η σύνδεση του HSI με τα οικονομικά στοιχεία της φάρμας επιτρέπει συγκριτική αξιολόγηση (benchmarking) μεταξύ διαφορετικών εκμεταλλεύσεων και εφαρμογή στοχευμένων βελτιώσεων.

Η ψηφιοποίηση της κτηνοτροφίας προάγει τη βιωσιμότητα και μειώνει το περιβαλλοντικό αποτύπωμα μέσω ορθολογικής χρήσης πόρων. Τα οικονομικά οφέλη εκτείνονται σε όλη την αλυσίδα αξίας, βελτιώνοντας την ανταγωνιστικότητα του αγροτικού τομέα και την πρόσβαση σε νέες αγορές. Παρά τα οφέλη, οι μικρομεσαίες επιχειρήσεις αντιμετωπίζουν προκλήσεις λόγω του αρχικού κόστους επένδυσης και της έλλειψης τεχνικής υποστήριξης. Για τον λόγο αυτό προτείνονται πολιτικές ενίσχυσης της καινοτομίας και χρηματοδοτικά προγράμματα όπως το Horizon Europe, που υποστηρίζουν την ψηφιακή μετάβαση της κτηνοτροφίας. [13]

Τέλος, η ενσωμάτωση τεχνητής νοημοσύνης (AI) στην ανάλυση οικονομικών δεικτών δημιουργεί προϋποθέσεις για προγνωστικά μοντέλα που προβλέπουν την εξέλιξη της κερδοφορίας σε πραγματικό χρόνο. Αυτό επιτρέπει στους παραγωγούς να λαμβάνουν πιο στοχευμένες αποφάσεις και να προσαρμόζονται στις μεταβολές της αγοράς με μεγαλύτερη ευελιξία.

2.6 Σύνθετοι δείκτες αξιολόγησης και *Herd Status Index (HSI)*

Η αυξανόμενη πολυπλοκότητα της σύγχρονης γαλακτοπαραγωγικής εκμετάλλευσης έχει οδηγήσει στην ανάγκη ανάπτυξης σύνθετων δεικτών που να επιτρέπουν μια ολοκληρωμένη αποτίμηση της κατάστασης του ζωικού κεφαλαίου. Οι παραδοσιακοί δείκτες, όπως η μέση παραγωγή γάλακτος ή το ποσοστό γονιμότητας, παρέχουν μεμονωμένες πληροφορίες, χωρίς να αποτυπώνουν την αλληλεπίδραση μεταξύ ευζωίας, παραγωγικότητας και οικονομικής βιωσιμότητας. Για τον λόγο αυτό, η έρευνα έχει στραφεί στη δημιουργία πολυκριτηριακών δεικτών, οι οποίοι συνδυάζουν δεδομένα από πολλαπλές πηγές για τη διαμόρφωση μιας πιο ρεαλιστικής και ολιστικής εικόνας της εκμετάλλευσης.

Ένας από τους πιο σημαντικούς και αναγνωρισμένους δείκτες αυτού του τύπου είναι ο Herd Status Index (HSI), ο οποίος αναπτύχθηκε αρχικά από τους Warner et al. (2020) ως εργαλείο benchmarking για τη συνολική αξιολόγηση της απόδοσης των γαλακτοπαραγωγικών κοπαδιών. Ο HSI συνδυάζει στοιχεία από 13 κρίσιμους τομείς της εκτροφής — όπως μακροβιότητα, υγεία, γονιμότητα, διατροφή, παραγωγή, ευζωία, διαχείριση νεαρών ζώων και κερδοφορία — και αποδίδει μια ενιαία τιμή που αντιπροσωπεύει τη συνολική «υγεία» και αποδοτικότητα της φάρμας. [1]

Τα δεδομένα προέρχονται συνήθως από καταγραφές του κοπαδιού που συλλέγονται συστηματικά, όπως οι βάσεις Dairy Herd Improvement (DHI), οι οποίες περιλαμβάνουν πληροφορίες για ταυτοποίηση ζώων, παραγωγή γάλακτος, δείκτες γονιμότητας, υγεία μαστού, χρήση φαρμάκων και αποδόσεις τροφής. Αυτά τα δεδομένα κανονικοποιούνται, δηλαδή προσαρμόζονται σε κοινή κλίμακα, ώστε να είναι συγκρίσιμα μεταξύ διαφορετικών φαρμών, και στη συνέχεια συνδυάζονται σε έναν σύνθετο δείκτη με χρήση στατιστικών μοντέλων ή αλγορίθμων τεχνητής νοημοσύνης.

Η βασική λειτουργία του HSI είναι η σύγκριση (benchmarking). Οι φάρμες με υψηλό HSI θεωρείται ότι διαχειρίζονται αποτελεσματικά το κοπάδι τους, παρουσιάζοντας μικρότερα ποσοστά ασθενειών, υψηλότερη γονιμότητα και σταθερότερη παραγωγικότητα. Αντίθετα, φάρμες με χαμηλό δείκτη μπορούν να εντοπίσουν τα αδύναμα σημεία τους και να σχεδιάσουν στοχευμένες παρεμβάσεις. Αυτή η διαδικασία βελτιώνει τη λήψη αποφάσεων, προωθεί τη διαφάνεια και ενισχύει την ανταγωνιστικότητα σε εθνικό και ευρωπαϊκό επίπεδο.

Παράλληλα, οι πολυκριτηριακοί δείκτες δεν περιορίζονται στον HSI. Άλλες προσεγγίσεις, όπως το Farm Sustainability Indicators (FSI), το Environmental Performance Index (EPI) και το Agro-System Performance Index (ASPI), ενσωματώνουν περιβαλλοντικές και κοινωνικοοικονομικές μεταβλητές. Οι δείκτες αυτοί χρησιμοποιούνται για τη συνολική αξιολόγηση της βιωσιμότητας των αγροτικών συστημάτων και για την ανάπτυξη πολιτικών αγροτικής ανάπτυξης. Το πλεονέκτημά τους είναι ότι λαμβάνουν υπόψη τόσο τη βιολογική απόδοση όσο και τις επιπτώσεις στο περιβάλλον, όπως οι εκπομπές μεθανίου, η κατανάλωση νερού και η ενεργειακή αποδοτικότητα.

Η μελέτη των Warner et al. (2020) έδειξε ότι ο HSI μπορεί να χρησιμοποιηθεί όχι μόνο για σύγκριση μεταξύ φαρμών αλλά και ως εργαλείο παρακολούθησης προόδου μέσα στο ίδιο κοπάδι με την πάροδο του χρόνου. Αυτό δίνει τη δυνατότητα στους παραγωγούς να μετρούν την αποτελεσματικότητα των παρεμβάσεων που εφαρμόζουν και να προσαρμόζουν τις στρατηγικές τους ανάλογα με τα δεδομένα. [1]

Η ανάπτυξη τέτοιων δεικτών βασίζεται σε εξελεγμένες μεθόδους πολυκριτηριακής ανάλυσης, Multi-Criteria Analysis (MCA) και ανάλυσης κύριων συνιστωσών, Principal Component Analysis (PCA), που επιτρέπουν την εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων από μεγάλους όγκους δεδομένων. Με τη βοήθεια της τεχνητής νοημοσύνης, οι δείκτες μπορούν να βελτιώνονται, λαμβάνοντας υπόψη νέες μεταβλητές, όπως γενετικά χαρακτηριστικά ή δεδομένα συμπεριφοράς.

Παρά τα πλεονεκτήματα, υπάρχουν και προκλήσεις. Η ποιότητα και η πληρότητα των δεδομένων παραμένει κρίσιμη, καθώς ελλιπή ή μη τυποποιημένα στοιχεία μπορούν να οδηγήσουν σε εσφαλμένες αξιολογήσεις. Επίσης, η ερμηνεία των σύνθετων δεικτών απαιτεί εκπαίδευση του χρήστη, ώστε να μη γίνεται λανθασμένη ανάγνωση των αποτελεσμάτων.

Επιπλέον, η σύνδεση των δεικτών όπως ο HSI με περιβαλλοντικά και κοινωνικά κριτήρια ανοίγει νέες προοπτικές για την πιστοποίηση βιώσιμων και φιλικών προς τα ζώα φαρμών. Στο πλαίσιο της Πράσινης Συμφωνίας της Ευρωπαϊκής Ένωσης, αυτά τα εργαλεία αναμένεται να αποτελέσουν τη βάση για συστήματα αξιολόγησης και επιδοτήσεων, συνδέοντας τη βιωσιμότητα με την οικονομική ενίσχυση. [14]

Συνολικά, η χρήση σύνθετων δεικτών, όπως ο HSI, μετασχηματίζει τον τρόπο με τον οποίο αξιολογούνται και συγκρίνονται οι γαλακτοπαραγωγικές μονάδες, προσφέροντας μια επιστημονικά τεκμηριωμένη, αντικειμενική και διαφανή εικόνα για τη συνολική τους απόδοση.

Κεφάλαιο 3 Μεθοδολογία και Τεχνολογίες Διαχείρισης Ζωικού Κεφαλαίου

3.1 Τεχνολογικές εξελίξεις στη διαχείριση ζωικού κεφαλαίου

Τα τελευταία χρόνια, οι φάρμες σε όλο τον κόσμο χρησιμοποιούν όλο και περισσότερο ψηφιακά εργαλεία για τη διαχείριση ζωικού κεφαλαίου. Αυτά τα εργαλεία βασίζονται σε ένα μεθοδικό πλαίσιο, το οποίο ξεκινά από τη συλλογή δεδομένων μέσω αισθητήρων και καταλήγει στη λήψη αποφάσεων βασισμένων σε δείκτες και αναλύσεις. Η βασική ιδέα είναι να αντικατασταθεί η αποκλειστική εμπειρική γνώση του παραγωγού με συστηματική, αντικειμενική πληροφόρηση.

Η σύγχρονη διαχείριση ζωικού κεφαλαίου (herd management) αποτελεί αναπόσπαστο μέρος της Ακριβούς κτηνοτροφίας ζώων (PLF), ενός κλάδου που συνδυάζει τις αρχές της ζωοτεχνίας, της πληροφορικής και της μηχανικής με στόχο τη συνεχή, εξατομικευμένη παρακολούθηση των ζώων. Στον πυρήνα της PLF βρίσκεται η ιδέα ότι κάθε ζώο είναι ένας φορέας δεδομένων: μέσω αισθητήρων και συστημάτων συλλογής πληροφορίας, μπορούν να παρακολουθούνται η συμπεριφορά, η φυσιολογική του κατάσταση, η παραγωγικότητα και οι συνθήκες ευζωίας του σε πραγματικό χρόνο.

Η τεχνολογική υποδομή αποτελεί το θεμέλιο πάνω στο οποίο στηρίζονται όλα τα σύγχρονα εργαλεία διαχείρισης ζωικού κεφαλαίου. Η ραγδαία ανάπτυξη των αισθητήρων, των δικτύων δεδομένων και των τεχνολογιών επεξεργασίας έχει μεταμορφώσει την κτηνοτροφία από μια δραστηριότητα βασισμένη στη χειρωνακτική παρατήρηση σε μια εξαιρετικά οργανωμένη διαδικασία συλλογής και αξιοποίησης πληροφοριών σε πραγματικό χρόνο.

Ένας από τους πιο ευρέως χρησιμοποιούμενους τύπους τεχνολογιών είναι οι φορητοί αισθητήρες δραστηριότητας, οι οποίοι συνήθως τοποθετούνται σε κολάρα ή στα άκρα. Αυτές οι μικρές συσκευές περιλαμβάνουν επιταχυνσιόμετρα και γυροσκόπια, καταγράφοντας κινήσεις και στάσεις των ζώων. Μέσα από τα δεδομένα αυτά, οι παραγωγοί μπορούν να εντοπίσουν αλλαγές στη συμπεριφορά που σχετίζονται με την υγεία, την αναπαραγωγή ή το στρες. Για παράδειγμα, μια απότομη αύξηση της δραστηριότητας είναι συχνά ένδειξη οίστρου, ενώ μια απότομη μείωση μπορεί να σημαίνει ασθένεια ή τραυματισμό. Η αξία αυτών των συστημάτων έχει επιβεβαιωθεί σε πλήθος μελετών που αναλύουν δεδομένα δραστηριότητας και στάσης από μεγάλες γαλακτοπαραγωγικές φάρμες. [15]

3.2 Εισαγωγή στην μεθοδολογία

Η ανάπτυξη και εφαρμογή συστημάτων διαχείρισης ζωικού κεφαλαίου σε φάρμες (Herd Management Tools) βασίζεται σε ένα συνδυασμό τεχνολογιών αισθητήρων, δικτύων δεδομένων, τεχνητής νοημοσύνης και υπολογιστικής ανάλυσης. Ο στόχος αυτών των συστημάτων είναι η παρακολούθηση, καταγραφή και αξιολόγηση όλων των κρίσιμων παραμέτρων που σχετίζονται με την υγεία, την ευζωία, τη διατροφή, την αναπαραγωγή και την παραγωγικότητα των ζώων.

Η μεθοδολογική βάση των σύγχρονων εργαλείων διαχείρισης ζωικού κεφαλαίου ακολουθεί τέσσερα διαδοχικά στάδια:

1. Συλλογή δεδομένων (**data acquisition**) μέσω αισθητήρων και συσκευών IoT.
2. Επεξεργασία Δεδομένων (**data preprocessing**) και φιλτράρισμα σημάτων για απομάκρυνση θορύβου ή ανωμαλιών.
3. Ανάλυση και μοντελοποίηση (**data analytics & modeling**) με τεχνικές μηχανικής μάθησης (Machine Learning - ML) για την εξαγωγή δεικτών, ώστε να εξαχθούν δείκτες που συνδέονται με την υγεία, παραγωγή και ευζωία των ζώων.
4. Απόφαση και ανατροφοδότηση (**decision support**) σε πραγματικό χρόνο με χρήση αλγορίθμων τεχνητής νοημοσύνης (AI) και εργαλείων visualization.

Ένα από τα πιο γνωστά εργαλεία που προέκυψαν από αυτή τη μεθοδολογική λογική είναι ο Herd Status Index (HSI). Ο δείκτης αυτός συνδυάζει δεδομένα από 13 κρίσιμους τομείς —όπως μακροβιότητα, υγεία, αναπαραγωγή, παραγωγή, διατροφή και οικονομικούς παράγοντες— για να δώσει μια συνολική εικόνα της κατάστασης ενός ζωικού κεφαλαίου. Έτσι, ο κτηνοτρόφος δεν χρειάζεται να επεξεργάζεται μεμονωμένα μεγάλους όγκους στοιχείων, αλλά βλέπει συγκεντρωμένα, αξιόπιστα και απλά ευρήματα.

Αυτή η μεθοδολογία ακολουθεί το πλαίσιο Precision Livestock Farming (PLF), το οποίο ορίζει ένα ψηφιακό οικοσύστημα όπου κάθε ζώο αποτελεί μονάδα δεδομένων. Η πληροφορία δεν καταγράφεται απλώς, αλλά αναλύεται και συσχετίζεται με στόχο την πρόβλεψη μελλοντικών καταστάσεων – για παράδειγμα, πρόβλεψη οίστρου, αναγνώριση ασθένειας ή αξιολόγηση απόδοσης παραγωγής.

Στην πράξη, τα εργαλεία PLF ενσωματώνουν πολλαπλές τεχνολογικές στρώσεις:

- επίπεδο αισθητήρων (sensor layer),
- επίπεδο επικοινωνίας (network layer),
- επίπεδο ανάλυσης (data processing layer),
- και επίπεδο λήψης απόφασης (application layer).

Η λειτουργική αλληλεξάρτηση αυτών των στρωμάτων επιτρέπει τη συνεχή ροή δεδομένων και τη λήψη ακριβών, αυτοματοποιημένων αποφάσεων, μειώνοντας το ανθρώπινο σφάλμα και το λειτουργικό κόστος. Η λειτουργία αυτής της κυκλικής διαδικασίας δημιουργεί ένα “έξυπνο οικοσύστημα”, όπου η τεχνολογία αναλαμβάνει την παρακολούθηση και ο άνθρωπος τη λήψη στρατηγικών αποφάσεων. Η PLF οδηγεί σε μεγαλύτερη παραγωγικότητα, βελτίωση της ευζωίας και μείωση κόστους, μέσω της πρόληψης ασθενειών και της έγκαιρης παρέμβασης.

3.3 Τεχνολογική υποδομή και αισθητήρες

Ένας από τους πιο ευρέως χρησιμοποιούμενους τύπους τεχνολογιών είναι οι φορητοί αισθητήρες δραστηριότητας, οι οποίοι συνήθως τοποθετούνται σε κολάρα ή στα άκρα. Αυτές οι μικρές συσκευές περιλαμβάνουν επιταχυνσιόμετρα και γυροσκόπια, καταγράφοντας κινήσεις και στάσεις των ζώων. Μέσα από τα δεδομένα αυτά, οι παραγωγοί μπορούν να εντοπίσουν αλλαγές στη συμπεριφορά που σχετίζονται με την υγεία, την αναπαραγωγή ή το στρες. Για παράδειγμα, μια απότομη αύξηση της δραστηριότητας είναι συχνά ένδειξη οίστρου, ενώ μια απότομη μείωση μπορεί να σημαίνει ασθένεια ή τραυματισμό. Η αξία αυτών των συστημάτων έχει επιβεβαιωθεί σε πλήθος μελετών που αναλύουν δεδομένα δραστηριότητας και στάσης από μεγάλες γαλακτοπαραγωγικές φάρμες. [15]

Παράλληλα, οι αισθητήρες rumen bolus έχουν φέρει επανάσταση στην παρακολούθηση της φυσιολογικής κατάστασης των αγελάδων. Πρόκειται για συσκευές που τοποθετούνται στο στομάχι των ζώων και καταγράφουν σε πραγματικό χρόνο τη θερμοκρασία και το pH. [16] Οι μεταβολές σε αυτές τις τιμές δίνουν πολύ πρώιμες ενδείξεις για πεπτικά προβλήματα, όπως η οξέωση, και έτσι επιτρέπουν γρήγορη επέμβαση πριν παρουσιαστούν σοβαρά συμπτώματα. Αυτή η τεχνολογία έχει αποδειχθεί ιδιαίτερα αποτελεσματική σε φάρμες με υψηλή πυκνότητα ζώων, όπου η ατομική παρακολούθηση είναι δύσκολη.

Στον τομέα της γαλακτοπαραγωγής, οι μετρητές αγωγιμότητας και οι ηλεκτρονικοί milk meters έχουν καθιερωθεί ως κρίσιμα εργαλεία για τον έλεγχο της υγείας των μαστών. Η αύξηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του γάλακτος αποτελεί πρώιμο σημάδι μαστίτιδας, επιτρέποντας στον παραγωγό να δράσει προτού η νόσος εξαπλωθεί. Επιπλέον, οι milk meters παρέχουν ακριβή μέτρηση της ημερήσιας παραγωγής κάθε ζώου, στοιχείο καθοριστικό για τη διαχείριση κόστους και την αξιολόγηση απόδοσης. [17]

Ιδιαίτερα σημαντική πρόοδος έχει σημειωθεί και στην οπτική παρακολούθηση μέσω καμερών. Οι στατικές κάμερες υψηλής ευκρίνειας, σε συνδυασμό με αλγορίθμους τεχνητής νοημοσύνης, δίνουν τη δυνατότητα για συνεχή και μη παρεμβατική παρακολούθηση των ζώων. Η τεχνολογία Computer vision μπορεί να αναγνωρίζει κάθε ζώο ξεχωριστά, να καταγράφει τη στάση του σώματος, να εντοπίζει χωλότητα ή αλλαγές στη συμπεριφορά και να ειδοποιεί τον παραγωγό σε πραγματικό χρόνο. Το μεγάλο πλεονέκτημα είναι ότι οι κάμερες μπορούν να παρακολουθούν πολλά ζώα ταυτόχρονα χωρίς φυσική επαφή, μειώνοντας το κόστος και την ανάγκη συνεχούς ανθρώπινης παρουσίας. [18]

Πέρα από τους αισθητήρες που σχετίζονται με τα ίδια τα ζώα, υπάρχει και ένα ολοκληρωμένο οικοσύστημα περιβαλλοντικών αισθητήρων, όπως μετρητές θερμοκρασίας και υγρασίας στους στάβλους, ανιχνευτές αμμωνίας, αισθητήρες φωτισμού και αερισμού. Τα δεδομένα αυτά επιτρέπουν στους παραγωγούς να διασφαλίσουν βελτιστοποιημένες συνθήκες ευζωίας, κάτι που έχει άμεσο αντίκτυπο στην υγεία και παραγωγή. Η παρακολούθηση του μικροκλίματος στους στάβλους μπορεί να μειώσει δραματικά την εμφάνιση αναπνευστικών ασθενειών και να βελτιώσει τη συνολική αποδοτικότητα του ζωικού κεφαλαίου. [1]

Η λειτουργία όλων αυτών των αισθητήρων απαιτεί κατάλληλη υπολογιστική υποδομή. Σε πολλές φάρμες, ένα μέρος της επεξεργασίας των δεδομένων γίνεται επιτόπου (edge computing) για να μειωθεί ο χρόνος απόκρισης των ειδοποιήσεων. Για πιο σύνθετες αναλύσεις και μακροχρόνια αποθήκευση χρησιμοποιούνται απομακρυσμένοι διακομιστές (cloud), που επιτρέπουν επίσης τη σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ διαφορετικών εκμεταλλεύσεων.

Ένα πρακτικό πρόβλημα που εντοπίζεται σε πολλές χώρες, συμπεριλαμβανομένης της Ελλάδας, είναι ότι οι φάρμες συχνά δεν διαθέτουν αξιόπιστη σύνδεση στο διαδίκτυο, κάτι που δυσκολεύει την πλήρη αξιοποίηση των συστημάτων αυτών. Για να αντιμετωπιστεί αυτό, αναπτύσσονται λύσεις που λειτουργούν offline και συγχρονίζουν τα δεδομένα μόλις επανέλθει η σύνδεση. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι το ερευνητικό έργο Digi4Live, το οποίο δοκιμάζει τέτοιες τεχνολογίες σε διάφορες ευρωπαϊκές χώρες. [19]

Τέλος, η επιτυχία αυτών των εργαλείων εξαρτάται από την ευχρηστία τους. Οι τελικοί χρήστες είναι παραγωγοί, συχνά χωρίς προηγμένη τεχνολογική κατάρτιση. Για τον λόγο αυτό, οι εταιρείες αναπτύσσουν φιλικές διεπαφές με απλά dashboards, χρωματικούς δείκτες και άμεσες ειδοποιήσεις, ώστε να μπορούν να ληφθούν αποφάσεις χωρίς εξειδικευμένες γνώσεις.

Συνολικά, η τεχνολογική υποδομή των σύγχρονων εργαλείων διαχείρισης ζωικού κεφαλαίου περιλαμβάνει ένα πολυεπίπεδο σύστημα αισθητήρων, δικτύων και συστημάτων επεξεργασίας που μετατρέπουν δεδομένα σε χρήσιμες πληροφορίες για λήψη αποφάσεων σε πραγματικό χρόνο.

3.4 Ανάλυση και ενοποίηση δεδομένων

Η πραγματική αξία των αισθητήρων και των συσκευών έγκειται στη δυνατότητα σύνθεσης των δεδομένων που παράγουν. Η ολοκληρωμένη ανάλυση επιτρέπει την εξαγωγή σύνθετων δεικτών ευζωίας, υγείας και παραγωγής, καθώς και την πρόβλεψη συμβάντων.

Οι σύγχρονες φάρμες συλλέγουν καθημερινά εκατομμύρια σημεία δεδομένων (big data). Αυτά τα δεδομένα υποβάλλονται σε ανάλυση με αλγορίθμους μηχανικής μάθησης (όπως Random Forests, Gradient Boosting). Τα συστήματα μπορούν να αναγνωρίσουν πρότυπα συμπεριφοράς που προηγούνται ασθενειών ή αποκλίσεων στην παραγωγή. [12]

Παράλληλα, μέσω τεχνικών data fusion, τα δεδομένα από διαφορετικούς αισθητήρες (π.χ. θερμοκρασία, κίνηση, pH) συνδυάζονται για να παραχθούν σύνθετοι δείκτες, όπως ο Herd Status Index (HSI). Ο δείκτης αυτός συνθέτει 13 επιμέρους παραμέτρους — υγεία, διατροφή, αναπαραγωγή, παραγωγικότητα, ευζωία — σε έναν συνολικό αριθμητικό δείκτη απόδοσης. [13]

Η συλλογή δεδομένων στις σύγχρονες φάρμες πραγματοποιείται μέσω ενός κατανεμημένου συστήματος αισθητήρων IoT που λειτουργούν σε συνεχή ροή. Κάθε συσκευή δημιουργεί πακέτα δεδομένων τα οποία περιλαμβάνουν μεταβλητές όπως θερμοκρασία, επίπεδο δραστηριότητας, αγωγιμότητα γάλακτος, pH rumen, ποσοστό υγρασίας αέρα και συγκέντρωση CO₂. Τα δεδομένα μεταδίδονται με πρωτόκολλα Message Queuing Telemetry Transport (MQTT) ή Long Range Wan (LoRaWAN), τα οποία έχουν χαμηλή καθυστέρηση και κατανάλωση ενέργειας. [20]

Κατά το στάδιο της προ επεξεργασίας, εφαρμόζονται τεχνικές φιλτραρίσματος Kalman και moving average smoothing ώστε να απομακρυνθεί ο τυχαίος θόρυβος. Παράλληλα, χρησιμοποιούνται μέθοδοι data fusion, δηλαδή συνδυασμός πληροφοριών από πολλαπλούς αισθητήρες για ακριβέστερη εκτίμηση της φυσιολογικής κατάστασης κάθε ζώου.

Η ανάλυση δεδομένων βασίζεται σε τεχνικές μηχανικής μάθησης (Machine Learning – ML) και τεχνητής νοημοσύνης (AI). Οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενοι αλγόριθμοι περιλαμβάνουν:

- Random Forest και Gradient Boosting, για πρόβλεψη κινδύνου ασθένειας.
- Support Vector Machines (SVM), για ταξινόμηση μοτίβων συμπεριφοράς (π.χ. στάση, μηρυκασμός, περπάτημα).
- Convolutional Neural Networks (CNNs), για ανάλυση βίντεο και φωτογραφίας.
- Recurrent Neural Networks (RNNs), για πρόβλεψη μελλοντικής παραγωγής γάλακτος ή αναπαραγωγικών κύκλων.

Μελέτες έδειξαν ότι μοντέλα εκπαιδευμένα με δεδομένα από αισθητήρες κολάρων πέτυχαν μεγάλη ακρίβεια στην πρόβλεψη συμπεριφοράς οίστρου. Στη φάση της αξιολόγησης μοντέλων, χρησιμοποιούνται δείκτες όπως Precision, Recall, F1-Score. Η χρήση cross-validation επιτρέπει τον έλεγχο υπερεκπαίδευσης (overfitting). Τα αποτελέσματα απεικονίζονται μέσω dashboards BI (Power BI, Grafana) ή συστημάτων farm management software, επιτρέποντας στον παραγωγό να λαμβάνει απόφαση σε πραγματικό χρόνο. Παράλληλα, εφαρμόζονται τεχνικές predictive analytics για την εκτίμηση παραμέτρων όπως η ημερήσια απόδοση γάλακτος ή ο κίνδυνος μαστίτιδας.

Η διαχείριση μεγάλου όγκου δεδομένων (Big Data Management) απαιτεί αρχιτεκτονικές ETL (Extract-Transform-Load) και data pipelines με Apache Kafka και Spark. Αυτά επιτρέπουν τη ροή δεδομένων από χιλιάδες αισθητήρες και την αποθήκευση σε βάσεις τύπου NoSQL (MongoDB ή Cassandra). Στη συνέχεια, οι αλγόριθμοι AI εκτελούνται είτε τοπικά μηχανήματα είτε σε cloud.

Η συνδυασμένη ανάλυση των δεδομένων ζωικού και περιβαλλοντικού επιπέδου παρέχει τη βάση για την υπολογιστική παραγωγή δείκτη κατάστασης ζωικού κεφαλαίου (Herd Status Index – HSI). Η ενοποίηση αισθητήρων, AI και cloud analytics έχει μετατρέψει την παραδοσιακή κτηνοτροφία σε κυβερνο-φυσικό σύστημα, Cyber-Physical System (CPS), όπου οι πληροφορίες ροής και η φυσική δραστηριότητα των ζώων αλληλεπιδρούν συνεχώς μέσω ανατροφοδότησης.

3.5 Εφαρμογή και αξιολόγηση απόδοσης

Η επιτυχής εφαρμογή συστημάτων PLF απαιτεί συνδυασμό τεχνικής υποδομής και εκπαίδευσης ανθρώπινου δυναμικού. Πιλοτικές εφαρμογές στην Ολλανδία, τη Δανία και τη Γερμανία έδειξαν ότι η ενσωμάτωση συστημάτων παρακολούθησης σε φάρμες άνω των 100 ζώων οδήγησε σε αύξηση της παραγωγής γάλακτος κατά 15–20%, μείωση φαρμακευτικής δαπάνης κατά 30% και βελτίωση της γονιμότητας κατά 10%. [12]

Η αξιολόγηση γίνεται μέσω δεικτών απόδοσης, Key Performance Indicators (KPIs), όπως:

- μέση παραγωγή ανά ζώο
- ρυθμός εμφάνισης ασθενειών
- ποσοστό χωλότητας
- ενεργειακή απόδοση ανά λίτρο γάλακτος
- ρυθμός επιστροφής επένδυσης, Return on Investment (ROI).

Επιπλέον, η αποδοχή των τεχνολογιών από τους παραγωγούς είναι καθοριστική. Έρευνες δείχνουν ότι οι φάρμες που επενδύουν στην εκπαίδευση προσωπικού έχουν ταχύτερη υιοθέτηση των νέων ψηφιακών εργαλείων.

Η πρακτική εφαρμογή ενός συστήματος διαχείρισης ζωικού κεφαλαίου περιλαμβάνει τέσσερα τεχνικά βήματα: ενσωμάτωση αισθητήρων, παραμετροποίηση δεδομένων, ανάλυση παραγωγής και αξιολόγηση απόδοσης.

Κατά την ενσωμάτωση αισθητήρων, οι συσκευές διασυνδέονται σε τοπικό δίκτυο LAN/Wi-Fi ή LPWAN. Η αντιστοίχιση κάθε αισθητήρα σε μοναδικό ζώο γίνεται μέσω RFID tag και ενημερώνεται στο Farm Management System (FMS).

Η παραμετροποίηση δεδομένων περιλαμβάνει τη χαρτογράφηση όλων των αισθητήρων με τους αντίστοιχους βιολογικούς δείκτες (π.χ. επιτάχυνση → δραστηριότητα, pH → μεταβολική ισορροπία). Εφαρμόζονται αλγόριθμοι κανονικοποίησης όπως ο min-max scaling ώστε όλες οι μετρήσεις να συγκρίνονται σε ενιαία κλίμακα.

Η αξιολόγηση απόδοσης πραγματοποιείται με βάση δείκτες όπως ο HSI, ο δείκτης ευζωίας (Welfare Quality Index) και ο δείκτης ενεργειακής απόδοσης (Feed Efficiency Index). Οι Lovarelli et al. (2021) τεκμηρίωσαν ότι φάρμες που χρησιμοποιούν AI-based διαχείριση εμφανίζουν μέση βελτίωση απόδοσης 12% ανά ζώο και μείωση κόστους διατροφής 9%. [12] Τα αποτελέσματα των συστημάτων παρουσιάζονται σε πίνακες BI με χρονοσειρές, προβλέψεις και προειδοποιήσεις. Η ενσωμάτωση τεχνολογιών όπως το Digital Twin δημιουργεί ψηφιακό αντίγραφο της φάρμας, επιτρέποντας προσομοιώσεις παραγωγικών σεναρίων και ανάλυση «τι-εάν» (what-if analysis).

3.6 Ενσωμάτωση τεχνητής νοημοσύνης, ρομποτικής και εικονικής πραγματικότητας

Η ενσωμάτωση προηγμένων ψηφιακών τεχνολογιών στην κτηνοτροφία αποτελεί πλέον αντικείμενο συστηματικής επιστημονικής έρευνας και εφαρμοσμένης καινοτομίας. Η Τεχνητή Νοημοσύνη (AI), η Ρομποτική και η Εικονική Πραγματικότητα (VR) δεν αντιμετωπίζονται ως μελλοντικές ή πειραματικές λύσεις, αλλά ως λειτουργικά εργαλεία που επηρεάζουν άμεσα τη διαχείριση των εκμεταλλεύσεων και την ευζωία των ζώων. [7]

Η ψηφιακή παρακολούθηση, η αυτοματοποίηση των διαδικασιών και η χρήση προσομοιώσεων επιτρέπουν τη βελτιστοποίηση της παραγωγής γάλακτος, κρέατος και άλλων ζωικών προϊόντων, καθώς και τη μείωση της αβεβαιότητας στη λήψη αποφάσεων.

Η AI στην κτηνοτροφία αξιοποιεί δεδομένα που συλλέγονται από αισθητήρες, βιομετρικά συστήματα και περιβαλλοντικούς σταθμούς εντός των εγκαταστάσεων. Μέσω αλγορίθμων μηχανικής μάθησης και βαθιάς μάθησης, είναι δυνατή η παρακολούθηση της υγείας, της συμπεριφοράς και της παραγωγικότητας των ζώων σε πραγματικό χρόνο.

- Αισθητήρες και κάμερες ανιχνεύουν δραστηριότητες όπως κινητικότητα, κατανάλωση τροφής, θερμοκρασία σώματος και ήχους που σχετίζονται με δυσφορία ή ασθένεια. Οι αλγόριθμοι AI επεξεργάζονται τα δεδομένα αυτά, επιτρέποντας την έγκαιρη ανίχνευση προβλημάτων υγείας και την πρόληψη επιδημιών.
- Η AI συμβάλλει στη βελτιστοποίηση της παραγωγικότητας μέσω ανάλυσης πρότυπων συμπεριφοράς και παραγωγής. Η συνεχής παρακολούθηση επιτρέπει την προσαρμογή των διατροφικών προγραμμάτων και των συνθηκών διαβίωσης των ζώων, βελτιώνοντας την ευζωία και μειώνοντας τη χρήση.

Η νέα εποχή της PLF χαρακτηρίζεται από τη σύγκλιση AI, ρομποτικής και εικονικής πραγματικότητας (VR). Η τεχνητή νοημοσύνη πλέον δεν χρησιμοποιείται μόνο για ανάλυση, αλλά και για προβλεπτική λήψη αποφάσεων, όπως η εκτίμηση κινδύνου ή η πρόβλεψη γονιμότητας βάσει συμπεριφορικών προτύπων.

Η Ρομποτική αυτοματοποιεί εργασίες όπως άρμεγμα, σίτιση, καθαρισμό και μετακίνηση ζώων. Αυτά τα συστήματα μειώνουν την ανάγκη για ανθρώπινη παρέμβαση και εξασφαλίζουν σταθερές και ακριβείς διαδικασίες.

- Τα ρομπότ αρμέγματος συλλέγουν δεδομένα παραγωγής και συμπεριφοράς, τα οποία τροφοδοτούν τα συστήματα ΑΙ, δημιουργώντας έναν κύκλο συνεχούς βελτίωσης της παραγωγής και της διαχείρισης των ζώων.
- Τα αυτοματοποιημένα συστήματα σίτισης και καθαρισμού μειώνουν τις απώλειες τροφής, βελτιώνουν την υγιεινή και ενισχύουν την ευζωία των ζώων. Η ρομποτική επιτρέπει παράλληλα τη συλλογή συνεχών δεδομένων για την ανάλυση της παραγωγικότητας.

Η ρομποτική έχει διεισδύσει στη διαχείριση ζωικού κεφαλαίου μέσω αυτόματων συστημάτων αρμέγματος, ρομποτικών τροφοδοτών και συσκευών καθαρισμού στάβλων, που λειτουργούν συνδεδεμένα με τις βάσεις δεδομένων της φάρμας. Ο συνδυασμός ΑΙ και ρομποτικής μειώνει την ανάγκη ανθρώπινης παρουσίας, επιτρέποντας λειτουργία 24/7.

Η εικονική πραγματικότητα (VR) χρησιμοποιείται πλέον για εκπαίδευση και ευαισθητοποίηση. Οι φοιτητές και παραγωγοί μπορούν να εκπαιδευτούν σε εικονικά περιβάλλοντα που αναπαριστούν φάρμες και διάφορες διαδικασίες όπως της άρμεξης. Οι προσομοιώσεις βοηθούν στην εκμάθηση της λειτουργίας εξοπλισμού, της διαχείρισης στάβλων και στην αντιμετώπιση απρόβλεπτων καταστάσεων χωρίς κίνδυνο για τα ζώα. Επίσης επιτρέπει τη σχεδίαση και αξιολόγηση νέων εγκαταστάσεων και πρακτικών διαχείρισης πριν την εφαρμογή τους στην πραγματική φάρμα, μειώνοντας το κόστος και τους κινδύνους.

Η Εικονική Πραγματικότητα (VR) αποτελεί ένα νέο εργαλείο για την εκπαίδευση και ενημέρωση αγροτών, φοιτητών και του κοινού. Μέσω τρισδιάστατων περιβαλλόντων, οι χρήστες μπορούν να «επισκεφτούν» εικονικά φάρμες, να δουν τις συνθήκες εκτροφής και να αλληλοεπιδράσουν με ψηφιακά αναπαριστώμενα ζώα και μηχανήματα. Η συνδυασμένη χρήση VR και ΑΙ δημιουργεί το πεδίο του Intelligent Immersive Analytics, όπου οι αποφάσεις βασίζονται σε αλληλεπιδραστική απεικόνιση δεδομένων.

Η συνδυαστική χρήση ΑΙ + VR + IoT δημιουργεί ένα νέο ολοκληρωμένο πρότυπο “έξυπνης φάρμας” ή διαφορετικά ένα ολοκληρωμένο σύστημα κτηνοτροφίας όπου οι αποφάσεις λαμβάνονται αυτόματα, η παραγωγή παρακολουθείται σε πραγματικό χρόνο και η εκπαίδευση πραγματοποιείται με βιωματικό τρόπο.

Η επόμενη γενιά συστημάτων διαχείρισης ζωικού κεφαλαίου βασίζεται στη σύζευξη τεχνητής νοημοσύνης (Artificial Intelligence – ΑΙ) με τεχνολογίες εικονικής και επαυξημένης πραγματικότητας (Virtual & Augmented Reality – VR/AR). Αυτή η ολοκλήρωση επιτρέπει όχι μόνο την αυτοματοποίηση της διαχείρισης των ζώων, αλλά και την εκπαίδευση, ανάλυση και αλληλεπίδραση με τα δεδομένα σε τρισδιάστατο, προσομοιωμένο περιβάλλον.

Η τεχνητή νοημοσύνη εφαρμόζεται σε όλα τα επίπεδα του οικοσυστήματος PLF, από την επεξεργασία δεδομένων αισθητήρων έως τη λήψη αποφάσεων.

Στην πράξη, χρησιμοποιούνται κυρίως οι εξής κατηγορίες μοντέλων:

- Deep Learning Convolutional Neural Networks (CNNs) για αναγνώριση συμπεριφοράς, εντοπισμό ανωμαλιών βάδισης και ανάλυση εικόνων/βίντεο.
- Reinforcement Learning (RL) για προσαρμοστικά συστήματα διατροφής, όπου ο αλγόριθμος «μαθαίνει» βέλτιστα σχήματα σίτισης ανά ζώο.
- Explainable AI (XAI) για διαφανή πρότυπα πρόβλεψης, όπου το σύστημα εξηγεί γιατί προτάθηκε μια συγκεκριμένη ενέργεια, π.χ. θεραπευτική ή διατροφική.

Η μελέτη των Liakos et al. (2018) έδειξε ότι τα συστήματα deep learning σε συνδυασμό με αισθητήρες περιβάλλοντος βελτίωσαν κατά 17% την ακρίβεια πρόβλεψης παραγωγής γάλακτος και μείωσαν την κατανάλωση ζωοτροφών κατά 8%. [21] Επιπλέον, η τεχνητή νοημοσύνη συμβάλλει στην ανίχνευση ευζωίας μέσω βιομετρικών δεδομένων.

Στο επίπεδο της λήψης αποφάσεων, η AI χρησιμοποιείται για τη βελτιστοποίηση της χρήσης πόρων, εφαρμόζοντας multi-objective optimization που λαμβάνει υπόψη τη διατροφή, το κόστος και την περιβαλλοντική επίπτωση. Στην πρόβλεψη ασθενειών, χρησιμοποιούνται μοντέλα AI που συνδυάζουν δεδομένα φυσιολογίας, συμπεριφοράς και περιβάλλοντος. Η μελέτη των Mengyuan Chu et al. (2022) πρότεινε ένα σύστημα ανίχνευσης μαστίτιδας με MS-scSE-DenseNet αρχιτεκτονική, το οποίο πέτυχε ακρίβεια έως και 90,18% στην πρόβλεψη πριν εμφανιστούν συμπτώματα. [22]

Πλεονεκτήματα της ολοκλήρωσης AI & VR

Η ενσωμάτωση των δύο τεχνολογιών οδηγεί σε:

- Αυτοματοποιημένη λήψη αποφάσεων χωρίς συνεχή ανθρώπινη παρουσία.
- Αύξηση ευζωίας και παραγωγικότητας μέσω πρώιμης διάγνωσης και εξατομικευμένων παρεμβάσεων.
- Εκπαιδευτική διάχυση γνώσης, προσφέροντας στο κοινό πρόσβαση σε ρεαλιστικά μοντέλα φάρμας.
- Καλύτερη κοινωνική αποδοχή της κτηνοτροφίας, μειώνοντας την απόσταση μεταξύ καταναλωτή και παραγωγής.

Η τεχνολογική ολοκλήρωση αυτή αποτελεί το μεταβατικό στάδιο προς τις «έξυπνες φάρμες επόμενης γενιάς», όπου η παρακολούθηση, η πρόβλεψη και η λήψη αποφάσεων πραγματοποιούνται μέσω αυτοματοποιημένων, διασυνδεδεμένων και εκπαιδευτικά επεκτάσιμων συστημάτων.

Κεφάλαιο 4: Τεχνολογία Digital Twins στην Διαχείριση Ζωικού Κεφαλαίου

4.1 Εισαγωγή

Η σύγχρονη κτηνοτροφία αντιμετωπίζει αυξημένες απαιτήσεις για αποδοτικότητα, ευζωία ζώων και βιωσιμότητα. Η παραδοσιακή διαχείριση ζωικού κεφαλαίου βασίζεται σε περιοδικές παρατηρήσεις και εμπειρική λήψη αποφάσεων, που συχνά περιορίζονται από ανθρώπινο σφάλμα ή έλλειψη χρόνου (Eastwood et al., 2019).

Η χρήση Herd Management Tools με τεχνολογία Digital Twins επιτρέπει τη δημιουργία ψηφιακών, δυναμικών μοντέλων ζωικού κεφαλαίου, όπου οι αλλαγές σε πραγματικό χρόνο καταγράφονται, αναλύονται και εφαρμόζονται σε εικονικό ή πραγματικό περιβάλλον. Τα εργαλεία αυτά ενσωματώνουν δεδομένα από αισθητήρες, εικόνες, βιομετρικά σημεία και περιβαλλοντικούς σταθμούς, προσφέροντας μια ολοκληρωμένη εικόνα της κατάστασης κάθε ζώου και του ζωικού κεφαλαίου συνολικά (Wolfert et al., 2017).

Στόχος του κεφαλαίου είναι να εξετάσει σε βάθος τον ρόλο των Digital Twins στη διαχείριση ζωικού κεφαλαίου, αναλύοντας λειτουργίες, εφαρμογές, πλεονεκτήματα, περιορισμούς και προοπτικές.

4.2 Εισαγωγή στα Digital Twins

Στη σύγχρονη κτηνοτροφία, η διαχείριση ζωικού κεφαλαίου απαιτεί ακριβή παρακολούθηση της υγείας, της παραγωγικότητας και της ευζωίας των ζώων. Η παραδοσιακή διαχείριση βασίζεται σε περιοδικές επιθεωρήσεις και εμπειρικές αποφάσεις, οι οποίες συχνά περιορίζονται από ανθρώπινο σφάλμα ή ανεπαρκή δεδομένα (Eastwood et al., 2019).

Τα Digital Twins μετασχηματίζουν αυτή τη διαδικασία δημιουργώντας ψηφιακές αναπαραστάσεις του ζωικού κεφαλαίου, που ενημερώνονται συνεχώς με δεδομένα από αισθητήρες, κάμερες και συστήματα IoT. Η τεχνολογία αυτή επιτρέπει πρόβλεψη ασθενειών, βελτιστοποίηση διατροφής, αύξηση παραγωγικότητας και καλύτερη ευζωία ζώων.

Ένα Digital Twin είναι ένα ψηφιακό αντίγραφο ενός φυσικού συστήματος, το οποίο:

Αναπαριστά τη δομή και τις ιδιότητες του ζωικού κεφαλαίου. Προσομοιώνει τη συμπεριφορά και αλληλεπίδραση με το περιβάλλον. Ανταποκρίνεται σε πραγματικά δεδομένα και παρέχει προγνωστικά μοντέλα για λήψη αποφάσεων (Liakos et al., 2018).

4.3 Κύριες λειτουργίες και δομή

Συνοπτικά μερικές από τις κύριες λειτουργίες είναι οι παρακάτω:

- Συλλογή Δεδομένων: Θερμοκρασία, καρδιακοί παλμοί, δραστηριότητα, κατανάλωση τροφής, παραγωγή γάλακτος/κρέατος.
- Ανάλυση Δεδομένων: Αλγόριθμοι ΑΙ αναγνωρίζουν μοτίβα, ανωμαλίες και προβλέπουν ασθένειες.
- Προσομοιώσεις: Εφαρμογή σεναρίων αλλαγής διατροφής, χώρου ή περιβάλλοντος πριν εφαρμοστούν στην πραγματική φάρμα.
- Συνεχής Ανατροφοδότηση: Οι αποφάσεις βασίζονται σε ζωντανά δεδομένα και προσαρμόζονται στα Digital Twins.

Οι χρήστες μπορούν να παρακολουθούν τα Digital Twins μέσω 3D dashboards ή VR περιβαλλόντων, λαμβάνοντας ειδοποιήσεις, αναλύσεις και προτάσεις. Παρακάτω θα περιγράψουμε τις λειτουργίες των Digital Twins που συμβάλουν στην βελτίωση της διαχείρισης μιας φάρμας.

Παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο: Τα Digital Twins επιτρέπουν τη συνεχή παρακολούθηση της κατάστασης των ζώων. Οι κτηνοτρόφοι μπορούν να ενημερώνονται άμεσα για:

- Την υγεία των ζώων
- Τη συμπεριφορά και τη δραστηριότητά τους
- Τις περιβαλλοντικές συνθήκες

Η λειτουργία αυτή συμβάλλει στην έγκαιρη αντιμετώπιση προβλημάτων.

Πρόβλεψη και πρόληψη προβλημάτων:

Μέσω της ανάλυσης δεδομένων, τα Digital Twins μπορούν να εντοπίζουν πρότυπα συμπεριφοράς και να προβλέπουν πιθανά προβλήματα, όπως:

- Ασθένειες
- Μείωση παραγωγικότητας
- Προβλήματα διατροφής
- Αλλαγές συμπεριφοράς

Προσομοίωση και λήψη αποφάσεων: Τα Digital Twins επιτρέπουν τη δοκιμή διαφορετικών σεναρίων διαχείρισης χωρίς να επηρεάζεται το πραγματικό κοπάδι. Οι κτηνοτρόφοι μπορούν να προσομοιώνουν:

- Αλλαγές στη διατροφή
- Μεταβολές περιβαλλοντικών συνθηκών
- Διαφορετικές στρατηγικές διαχείρισης

Βελτιστοποίηση παραγωγικότητας: Η ανάλυση των δεδομένων συμβάλλει στη βελτίωση της παραγωγής ζωικών προϊόντων. Τα Digital Twins επιτρέπουν:

- Προσαρμογή της διατροφής
- Παρακολούθηση αναπαραγωγής
- Αξιολόγηση παραγωγικής απόδοσης

Βελτίωση ευζωίας ζώων: Η τεχνολογία συμβάλλει στη διατήρηση καλύτερων συνθηκών διαβίωσης των ζώων, μέσω της παρακολούθησης παραγόντων όπως θερμοκρασία περιβάλλοντος, επίπεδα στρες, δραστηριότητα και κινητικότητα.

Υποστήριξη βιώσιμης διαχείρισης: Τα Digital Twins βοηθούν στη σωστή αξιοποίηση φυσικών πόρων, όπως η διαχείριση βοσκής, εξοικονόμηση ζωοτροφών και μείωση περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Η λειτουργία αυτή συμβάλλει στη βιώσιμη ανάπτυξη της κτηνοτροφίας.

Η λειτουργία των Digital Twins βασίζεται στη συνεργασία διαφορετικών τεχνολογικών στοιχείων, τα οποία συνθέτουν τη δομή τους.

Φυσικό σύστημα (Physical System): Το φυσικό σύστημα αποτελεί το πραγματικό αντικείμενο που αναπαρίσταται ψηφιακά. Στην κτηνοτροφία μπορεί να περιλαμβάνει μεμονωμένα ζώα, ολόκληρα κοπάδια, κτηνοτροφικές εγκαταστάσεις, περιβαλλοντικές συνθήκες παραγωγής. Το φυσικό σύστημα αποτελεί τη βασική πηγή δεδομένων για τη δημιουργία του ψηφιακού μοντέλου.

Σύστημα συλλογής δεδομένων: Η συλλογή δεδομένων πραγματοποιείται μέσω σύγχρονων τεχνολογιών, όπως:

- Αισθητήρες υγείας και δραστηριότητας
- Συστήματα GPS
- Φορητές συσκευές παρακολούθησης
- Περιβαλλοντικοί αισθητήρες θερμοκρασίας και υγρασίας

Οι αισθητήρες αυτοί καταγράφουν συνεχώς πληροφορίες σχετικά με την κατάσταση των ζώων και το περιβάλλον διαβίωσης.

Δίκτυα επικοινωνίας και μετάδοσης δεδομένων: Τα δεδομένα που συλλέγονται μεταφέρονται μέσω ασύρματων δικτύων και τεχνολογιών (IoT). Τα δίκτυα αυτά επιτρέπουν τη μετάδοση πληροφοριών σε πραγματικό χρόνο, διευκολύνοντας τη συνεχή ενημέρωση του ψηφιακού μοντέλου.

Υπολογιστικά συστήματα και λογισμικό ανάλυσης: Τα δεδομένα αποθηκεύονται και αναλύονται σε υπολογιστικά συστήματα ή πλατφόρμες υπολογιστικού νέφους (cloud computing). Το λογισμικό χρησιμοποιεί αλγορίθμους ανάλυσης δεδομένων και τεχνητή νοημοσύνη για τη δημιουργία του ψηφιακού δίδυμου και την εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων.

Ψηφιακό μοντέλο (Digital Model): Το ψηφιακό μοντέλο αποτελεί την εικονική αναπαράσταση του φυσικού συστήματος. Ενημερώνεται συνεχώς από τα δεδομένα που συλλέγονται και επιτρέπει την παρακολούθηση και προσομοίωση της κατάστασης των ζώων.

Σχετικά με το ψηφιακό μοντέλο μπορούμε να τα κατηγοριοποιήσουμε σε 2 ειδών υπο-μοντέλα : Ζωικά μοντέλα και Περιβαλλοντικά μοντέλα που μπορούν να αναπαρασταθούν

- Ζωικά μοντέλα: Αναπαριστούν κάθε ζώο ξεχωριστά, με δεδομένα όπως:

Ιστορικό παραγωγής (γάλα, κρέας, βάρος), Ζωτικά σημεία και δείκτες υγείας, Συμπεριφορά και κινητικότητα.

Ανταπόκριση σε στρες ή ασθένειες.

- Περιβαλλοντικά μοντέλα:

Αναπαριστούν τον χώρο στέγασης και την έκταση βόσκησης, Θερμοκρασία, υγρασία, ποιότητα αέρα, Κατανομή τροφής και νερού, Αλληλεπιδράσεις μεταξύ ζώων και περιβάλλοντος.

4.4 Τεχνολογίες και αρχιτεκτονική των Digital Twins

Οι πρόσφατες τεχνολογικές εξελίξεις έχουν εξαλείψει τα τεχνικά εμπόδια για την υλοποίηση των Digital twins. Το πλαίσιο των Digital Twins ενσωματώνει διάφορες τεχνικές, όπως υπολογιστικό νέφος (cloud computing), μηχανική μάθηση (machine learning), επαυξημένη πραγματικότητα (augmented reality) και εικονική πραγματικότητα (virtual reality), Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT) και διεπαφές προγραμματισμού εφαρμογών (application programming interfaces), προκειμένου να επιτευχθεί η εφαρμογή των DT. Κάθε τεχνολογία όχι μόνο παρέχει βασικές λειτουργίες, αλλά επίσης ενισχύει τον συγχρονισμό, την ευφυΐα και την αλληλεπίδραση με τον χρήστη μέσα στο πλαίσιο των DT. Παρακάτω θα αναλύσουμε αυτές τις τεχνολογίες.

Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT):

Το IoT αποτελεί τη ραχοκοκαλιά των Digital Twins, συνδέοντας φυσικές συσκευές και αισθητήρες που συλλέγουν και μεταδίδουν συνεχώς δεδομένα. Αυτή η ροή δεδομένων σε πραγματικό χρόνο δίνει τη δυνατότητα στο εικονικό μοντέλο να αντικατοπτρίζει τις αλλαγές στο φυσικό αντικείμενο με ακρίβεια και έγκαιρα. Επιπλέον, συλλέγονται δεδομένα σχετικά με βιολογικές παραμέτρους, όπως η θερμοκρασία σώματος των ζώων, το βάρος, η κίνηση και άλλες σχετικές πληροφορίες. Επίσης παρακολουθούνται δείκτες υγείας των ζώων, όπως η δραστηριότητα, το στρες, η αναπνοή και πιθανά προβλήματα. Η μετάδοση αυτών των δεδομένων μέσω πρωτοκόλλων επικοινωνίας και πυλών (gateways) επιτρέπει να πραγματοποιείτε έξυπνη βελτιστοποίηση του περιβάλλοντος, προβλεπτικά σενάρια υγείας και παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο, διασφαλίζοντας ότι το εικονικό μοντέλο παραμένει συγχρονισμένο με το φυσικό σύστημα.

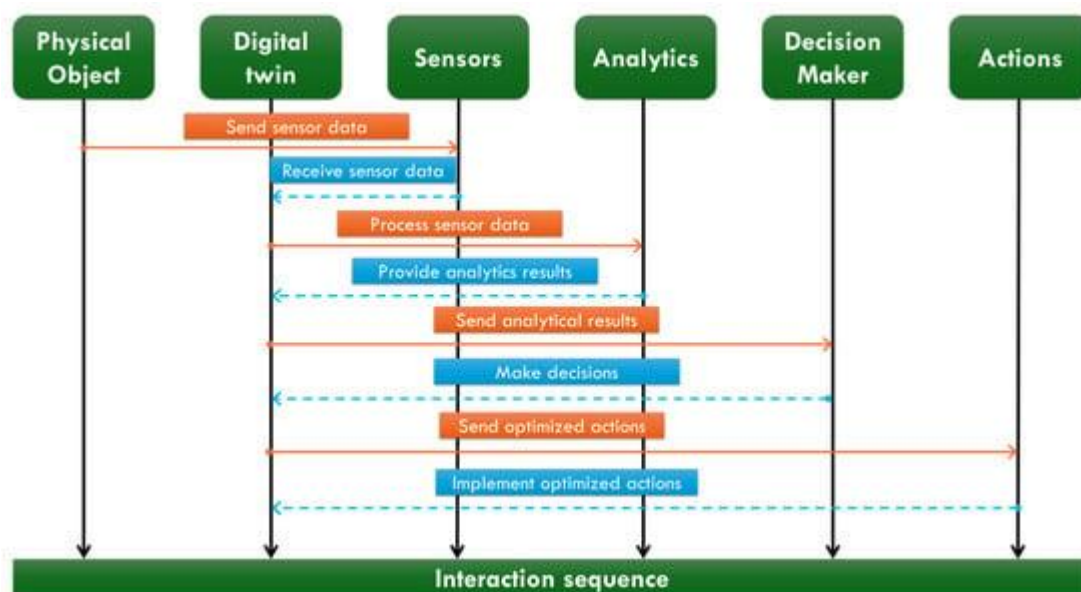
Υπολογιστικό νέφος (Cloud computing):

Το cloud computing παρέχει την επεκτάσιμη υποδομή που απαιτείται για τη διαχείριση μεγάλων όγκων δεδομένων που παράγονται από συστήματα Digital Twins. Προσφέροντας απομακρυσμένη πρόσβαση σε πόρους αποθήκευσης και επεξεργασίας, υποστηρίζει την παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο και επιτρέπει προγνωστική ανάλυση σε παγκόσμια κλίμακα. Η τεχνολογία αυτή μειώνει την ανάγκη για τοπική υποδομή, καθιστώντας την υλοποίηση των Digital Twins πιο ευέλικτη και οικονομικά αποδοτική.

Επαυξημένη πραγματικότητα (AR) και Εικονική πραγματικότητα (VR):

Η AR και η VR εισάγουν την καθηλωτική οπτικοποίηση στα Digital twins, επιτρέποντας στους χρήστες να αλληλεπιδρούν με εικονικά μοντέλα σε τρισδιάστατο χώρο. Η AR προβάλλει δεδομένα σε πραγματικό χρόνο πάνω σε πραγματικό εξοπλισμό για την εκτέλεση εργασιών συντήρησης ή λειτουργίας, ενώ η VR χρησιμοποιεί πλήρως εικονικές προσομοιώσεις για εκπαίδευση ή δοκιμή σχεδίων. Η χρήση αυτών των τεχνολογιών καθιστά τα συνήθως πολύπλοκα δεδομένα των Digital Twins πιο εύκολα προσβάσιμα και κατανοητά, βοηθώντας μηχανικούς και χειριστές να λαμβάνουν καλύτερες αποφάσεις.

Όλες μαζί, αυτές οι τεχνολογίες επιτρέπουν στα Digital Twins να συλλέγουν δεδομένα σε πραγματικό χρόνο από φυσικά συστήματα, να τα αναλύουν και να προσομοιώνουν σενάρια που παρέχουν αξιοποιήσιμες πληροφορίες για λήψη αποφάσεων. Το Σχήμα 1 παρουσιάζει ένα απλοποιημένο διάγραμμα ακολουθίας που αναπαριστά τις αλληλεπιδράσεις και τα επιμέρους στοιχεία που σχετίζονται με αυτές τις τεχνολογίες και καθιστούν δυνατή τον ψηφιακό μετασχηματισμό, όπου το φυσικό αντικείμενο αντιπροσωπεύει το πραγματικό αντικείμενο ή σύστημα που παρακολουθείται και ελέγχεται.

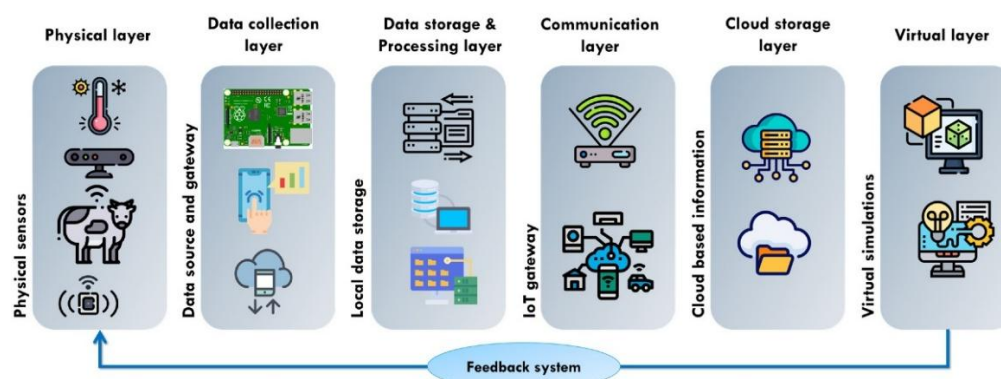


Σχήμα 1: Η βασική διαμόρφωση των στοιχείων του ψηφιακού διδύμου.

Πηγή: <https://www.mdpi.com/2077-0472/14/12/2231>

Το Digital Twin αποτελεί την εικονική αναπαράσταση του Φυσικού Αντικείμενου (Physical Object), μέσα στην οποία τα δεδομένα επεξεργάζονται και αναλύονται. Το Physical Object παρέχει στο Digital Twin δεδομένα που συλλέγονται από αισθητήρες, και στη συνέχεια το Digital Twin μεταδίδει τα δεδομένα αυτά στο στοιχείο Ανάλυσης (Analytics) για επεξεργασία. Το στοιχείο Ανάλυσης επιστρέφει τα αποτελέσματα της ανάλυσης στο Digital Twin. Στη συνέχεια, το Digital Twin μεταδίδει αυτά τα αναλυτικά αποτελέσματα στον υπεύθυνο λήψης αποφάσεων, ο οποίος βασίζει τις αποφάσεις του στις πληροφορίες που λαμβάνει. Έπειτα, το Digital Twin αποστέλλει βελτιστοποιημένες ενέργειες στο στοιχείο Ενεργειών (Actions). Το στοιχείο Ενεργειών εκτελεί τις βελτιστοποιημένες ενέργειες στο Φυσικό Αντικείμενο (Physical Object).

Για την αποτελεσματική ενσωμάτωση των συσκευών με τα εικονικά τους αντίγραφα και τη διασφάλιση ομαλής ανταλλαγής πληροφοριών μεταξύ των Digital Twins, των φυσικών διδύμων και των εξωτερικών συστημάτων, προτείνεται μια αρχιτεκτονική έξι επιπέδων, η οποία παρουσιάζεται στο Σχήμα 2. Η αρχιτεκτονική αυτή περιλαμβάνει διάφορες φυσικές συσκευές, αισθητήρες και συστήματα συλλογής δεδομένων. Τα Επίπεδα 1 και 2 αντιπροσωπεύουν τη φυσική οντότητα: το Επίπεδο 1 περιλαμβάνει συσκευές και αισθητήρες, ενώ το Επίπεδο 2 καθορίζει τις πηγές δεδομένων. Το Επίπεδο 3 περιλαμβάνει την αποθήκευση των δεδομένων (local data vault) που συλλέγει τιμές ελεγκτών από το Επίπεδο 2 και διευκολύνει την επικοινωνία μεταξύ των επιπέδων και της φυσικής οντότητας. Το Επίπεδο 4 μετατρέπει τα δεδομένα σε χρήσιμες πληροφορίες μέσω τεχνολογιών IoT, συνδέοντας το Επίπεδο 3 με το Επίπεδο 5. Το Επίπεδο 5 αποθηκεύει τα δεδομένα, βελτιώνοντας τη διαθεσιμότητα και την ακρίβεια, ενώ το Επίπεδο 6 παρακολουθεί την κατάσταση υγείας των μηχανών και περιλαμβάνει ιστορικές πληροφορίες σχετικά με το φυσικό δίδυμο. Το επίπεδο αυτό επιτρέπει στους χρήστες να αλληλεπιδρούν με μια εικονική εκδοχή του φυσικού διδύμου, υποστηρίζοντας τη λήψη αποφάσεων και τις προβλέψεις. [24]



Σχήμα 2: Ψηφιακό δίδυμο με αρχιτεκτονική έξι επιπέδων.

Πηγή: <https://www.mdpi.com/2077-0472/14/12/2231>

4.5 Παραδείγματα εφαρμογής

- Πρόληψη Ασθενειών

Συνδυασμός θερμοκρασίας, δραστηριότητας και παραγωγής γάλακτος για έγκαιρη ανίχνευση λοιμώξεων.

- Διαχείριση Αναπαραγωγής

Χρήση δεδομένων γονιμότητας και συμπεριφοράς για προγραμματισμό ζευγαρώματος και βελτιστοποίηση του ρυθμού ανανέωσης του ζωικού κεφαλαίου.

- Προσομοιώσεις Ακραίων Σεναρίων

Προσομοίωση ξηρασίας, ασθενειών ή αλλαγής διατροφής για εκτίμηση αποτελεσμάτων χωρίς κίνδυνο για τα ζώα.

- Παρακολούθηση Συμπεριφοράς και Ευζωίας

Ανάλυση κινητικότητας, συμπεριφοράς και στρες για βελτίωση χώρων ανάπαυσης και σίτισης. Με τη χρήση δεδομένων από αισθητήρες και κάμερες, οι ψηφιακές αναπαραστάσεις βοηθούν στον εντοπισμό αλλαγών στη συμπεριφορά ή την υγεία προτού γίνουν εμφανείς στο φυσικό ζώο, διευκολύνοντας την πρόβλεψη ασθενειών ή άγχους.

- Προσομοίωση και βελτιστοποίηση εγκαταστάσεων στάβλων

Τα ψηφιακά δίδυμα χρησιμοποιούνται για να δοκιμάζουν διαφορετικά σχέδια και λειτουργίες σε στάβλους πριν κατασκευαστούν στην πραγματικότητα.

- Λήψη αποφάσεων με βάση πρόβλεψη συμπεριφοράς

Τα Digital Twins μπορούν να ενσωματώνουν ανάλυση δεδομένων και τεχνητή νοημοσύνη ώστε να προβλέπουν πώς θα αντιδράσει ένα ζώο ή ένα κοπάδι σε αλλαγές, όπως διαφορετικές ποσότητες τροφής, νέα διατροφή, περιβαλλοντικές αλλαγές κ.ά. Αυτό δίνει στον κτηνοτρόφο τη δυνατότητα να δοκιμάσει σενάρια στο ψηφιακό αντίγραφο πριν τα εφαρμόσει στην πραγματικότητα.

4.6 Σύγκριση με την παραδοσιακή κτηνοτροφία

Οι κτηνοτρόφοι βελτιστοποιούν τις πρακτικές παραγωγής τους εδώ και αιώνες. Οι περισσότερες από τις βέλτιστες πρακτικές τους προέρχονται από την προσεκτική παρατήρηση των ζώων. Παρόλο που νέες τεχνολογίες, όπως τα ψηφιακά δίδυμα, προσφέρουν νέες δυνατότητες για απομακρυσμένη φροντίδα των ζώων, οι αγρότες μπορεί να διστάζουν να αλλάξουν τις παραδοσιακές τους πρακτικές, κυρίως επειδή έχουν ήδη επενδύσει πολύ χρόνο, προσπάθεια και χρήματα στον παραδοσιακό τρόπο εκτροφής των ζώων σε κοντινή απόσταση.

Η υιοθέτηση νέων συστημάτων σημαίνει επίσης ότι θα πρέπει, σε κάποιο βαθμό, να εγκαταλείψουν υφιστάμενες διαδικασίες και μορφές εργασίας. Με άλλα λόγια, αντιμετωπίζουν σημαντικό κόστος μετάβασης. Αυτό αποτελεί τον σημαντικότερο περιορισμό στην υιοθέτηση των ψηφιακών διδύμων στην κτηνοτροφία.

Το υψηλό κόστος μετάβασης στις τεχνολογίες διαχείρισης της κτηνοτροφίας μπορεί να αποτελέσει εμπόδιο για τους αγρότες στην υιοθέτηση των ψηφιακών διδύμων, οδηγώντας τους στο να λαμβάνουν μόνο αποφάσεις χαμηλού ρίσκου. Αυτό συμβαίνει επειδή η κτηνοτροφία περιλαμβάνει πολλές άγνωστες μεταβλητές και από ποικίλα φυσικά και βιολογικά φαινόμενα. Ξηρασίες, επιδημίες, αλλαγές πολιτικής ή ακόμη και μεταβολές στη ζήτηση της αγοράς μπορούν να ανατρέψουν τα σχέδια ενός αγρότη μέσα σε λίγες εβδομάδες. Επομένως, οι περισσότεροι αγρότες θα επιθυμούσαν να υιοθετήσουν νέες τεχνολογίες, όπως τα ψηφιακά δίδυμα, μόνο αφού κατανοήσουν πώς αυτές μπορούν να συμβάλουν στη διαχείριση τέτοιων άγνωστων κινδύνων.

Εκτός του κόστους της ίδια τεχνολογίας το οποίο περιλαμβάνει τόσο τον εξοπλισμό (hardware) όσο και το λογισμικό (software), υπάρχουν τα κόστη υποδομής, όπως η πρόσθετη κατανάλωση ενέργειας, το αυξημένο εύρος ζώνης διαδικτύου ή ο επιπλέον εξοπλισμός που απαιτείται για την αποτελεσματική εφαρμογή της τεχνολογίας. Τέλος, υπάρχει το κόστος εκμάθησης, το οποίο μπορεί να περιλαμβάνει εκπαίδευση, πειραματισμό και πιθανές απώλειες λόγω λαθών. Επομένως οι αγρότες θα αξιολογούν διαρκώς το κόστος σε σχέση με τα πιθανά οφέλη. Εάν δεν παρουσιαστούν σαφή στοιχεία και εάν η απόδοση της επένδυσης δεν είναι ικανοποιητική, θα είναι δύσκολο να πειστούν για να υιοθετήσουν αυτή την τεχνολογία.

Σχετικά με τις υπάρχουσες μελέτες, υπάρχουν ελάχιστα παραδείγματα που να επιβεβαιώνουν τα οφέλη από την υιοθέτηση των ψηφιακών διδύμων. Δεν υπάρχουν επαρκή τεκμηριωμένα στοιχεία σχετικά με το πώς τα ψηφιακά δίδυμα μπορούν να βελτιώσουν βασικούς παραμέτρους απόδοσης και την κερδοφορία. Επιπλέον, είναι δύσκολο να συγκριθούν αυτές οι βελτιώσεις με το τι θα μπορούσε να επιτευχθεί χωρίς την υιοθέτηση των ψηφιακών διδύμων. Θα χρειαστούν ακόμη μερικά χρόνια μέχρι να ωριμάσει η τεχνολογία και να δημοσιευθούν αποτελέσματα από τα πρώτα πειράματα.

Ένα άλλο μεγάλο θέμα είναι η βιωσιμότητα της κτηνοτροφικής βιομηχανίας. Υπάρχουν ορισμένα σταθερά προβλήματα στην παραγωγή ζωικού κεφαλαίου, όπως της εκτεταμένης ατμοσφαιρικής και υδατικής ρύπανσης. Ουσίες όπως η αέρια αμμωνία στην ατμόσφαιρα και τα νιτρικά στα υπόγεια ύδατα μπορούν να απειλήσουν άμεσα την ανθρώπινη υγεία.

Η τεχνολογία των Digital Twins έχει τη δυνατότητα να συμβάλει ώστε η κτηνοτροφία να καταστεί πιο βιώσιμη με την πάροδο του χρόνου. Για παράδειγμα, οι Barni et al. (2018) ανέπτυξαν ένα πλαίσιο βασισμένο σε ψηφιακό δίδυμο, το οποίο στηρίζεται σε δεδομένα και διαδικασίες συστημάτων, με σκοπό την αξιολόγηση των επιδόσεων βιωσιμότητας των παραγωγικών εγκαταστάσεων και τη λήψη αποφάσεων με γνώμονα τη βιωσιμότητα [25].

Τα ψηφιακά δίδυμα μπορούν να ενισχύσουν τη βιωσιμότητα της κτηνοτροφίας με πολλούς τρόπους. Μέσω της συνεχούς παρακολούθησης και μέτρησης διαφόρων φυσιολογικών και ζωτικών ενδείξεων των ζώων, με τη χρήση φορητών αισθητήρων που υλοποιούνται μέσω του ψηφιακού διδύμου, οι αγρότες μπορούν να διαχειρίζονται αποτελεσματικά και ακόμη και να προβλέπουν ασθένειες πριν αυτές εκδηλωθούν. Αυτό θα είχε ως αποτέλεσμα τη μείωση της χρήσης φαρμάκων, αντιβιοτικών και άλλων χημικών που χρησιμοποιούνται στον κτηνοτροφικό τομέα, οδηγώντας σε πιο βιώσιμη ζωική παραγωγή.

Επιπλέον τα Digital Twins μπορούν να προσφέρουν λύσεις ενισχύοντας την ευζωία των ζώων κατά τη μεταφορά τους από τις εμπορικές φάρμες στα σφαγεία. Κατά τη μεταφορά, τα ζώα εκτίθενται σε παράγοντες όπως το στρες και ο συνωστισμός και φτάνουν τραυματισμένα ή σε κατάσταση εξάντλησης, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε κόπωση ή, σε ακραίες περιπτώσεις, σε θάνατο κατά την άφιξη στα σφαγεία. Πέρα από τις σοβαρές αρνητικές επιπτώσεις στην ευζωία των ζώων, αυτό επηρεάζει αρνητικά και την ποιότητα του σφαγίου και του κρέατος. Μέσω της μέτρησης της ευζωίας των ζώων κατά τη μεταφορά με τη χρήση τεχνολογιών αισθητήρων διασυνδεδεμένων με το ψηφιακό δίδυμο, η ευζωία μπορεί να βελτιωθεί σημαντικά, οδηγώντας σε πιο βιώσιμες συνθήκες μεταφοράς των ζώων. [26]

Παρακάτω θα συγκεντρώσουμε τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της υιοθέτησης των ψηφιακών διδύμων στην κτηνοτροφία.

Παράμετρος	Παραδοσιακή κτηνοτροφία	Digital Twins
Παρακολούθηση	Περιοδική, ανθρώπινο σφάλμα	Συνεχής, σε πραγματικό χρόνο
Πρόβλεψη ασθενειών/κινδύνων	Δύσκολη έως καθόλου, περιορισμένη έγκαιρη παρέμβαση	Έγκαιρη πρόβλεψη με ΑΙ
Διαχείριση παραγωγής	Βασισμένη σε εμπειρία	Βελτιστοποίηση μέσω δεδομένων
Διαχείριση πόρων	Σταθερό πρόβλημα	Συμβάλει στην βιωσιμότητα
Ευζωία ζώων	Εκτιμήσεις	Στόχευση παρεμβάσεων, μετρήσιμη
Κόστος	Αρχικό χαμηλό	Υψηλό κόστος μετάβασης, μείωση μακροπρόθεσμα.

Πλεονεκτήματα των Digital Twins:

- Ακριβής και συνεχής παρακολούθηση.
- Διαχείριση κινδύνων, πρόληψη ασθενειών και βελτίωση ευζωίας.
- Βελτιστοποίηση παραγωγής και διαχείρισης φυσικών πόρων.
- Υποστήριξη εκπαίδευσης και λήψης αποφάσεων.
- Μείωση μακροπρόθεσμων απωλειών, βελτίωση παραγωγικότητας.

Μειονεκτήματα των Digital Twins:

- Υψηλό κόστος μετάβασης και ανάγκη εκπαίδευσης προσωπικού.
- Χαμηλή απόδοση επένδυσης
- Απαιτείται συνεχής συντήρηση και ενημέρωση μοντέλων.
- Ζητήματα ιδιοκτησίας και ασφάλειας δεδομένων.
- Απαιτεί εκπαίδευση προσωπικού και αλλαγή κουλτούρας.
- Βελτιστοποίηση χρήσης τροφής και νερού, μείωση αποβλήτων και εκπομπών.
- Η τεχνολογία για την εφαρμογή στην κτηνοτροφία είναι σε πρώιμο στάδιο.

Τα Digital Twins αποτελούν καινοτόμο εργαλείο για τη σύγχρονη κτηνοτροφία, προσφέροντας: ακριβή διαχείριση ζωικού κεφαλαίου, προληπτική υγειονομική παρακολούθηση και βελτιστοποίηση παραγωγικότητας και πόρων.

Η επιτυχία της τεχνολογίας εξαρτάται από τη σωστή ενσωμάτωση των αισθητήρων, την εγκατάσταση και τη παραμετροποίηση του λογισμικού και των συστημάτων ανάλυσης. Επίσης σημαντικός παράγοντας είναι η εκπαίδευση του προσωπικού καθώς και η υποστήριξη που θα υπάρχει “after sales” μετά την παράδοση του τελικού ολοκληρωμένου συστήματος στον πελάτη - κτηνοτρόφο.

Κεφάλαιο 5: Τεχνολογία VR στην Διαχείριση Ζωικού Κεφαλαίου

5.1 Εισαγωγή

Το Virtual Reality (VR) αποτελεί μία από τις πιο δυναμικές τεχνολογίες που εφαρμόζονται στη σύγχρονη κτηνοτροφία. Μέσω εμβυθιστικών περιβαλλόντων, επιτρέπει στους διαχειριστές και στο προσωπικό να παρακολουθούν, να αλληλεπιδρούν και να εκπαιδεύονται σε πραγματικά ή προσομοιωμένα κοπάδια χωρίς φυσική παρουσία.

Συνδυαστικά Digital Twins με VR μπορούμε να έχουμε:

- Οπτικοποίηση δεδομένων σε πραγματικό χρόνο.
- Προσομοίωση σεναρίων αλλαγής διατροφής, χώρων ή συμπεριφοράς ζώων.
- Εκπαίδευση προσωπικού και φοιτητών σε ασφαλές περιβάλλον.
- Επιτρέπει παρακολούθηση του ζωικού κεφαλαίου από απόσταση.

Η τεχνολογία στοχεύει στη βελτίωση της ευζωίας των ζώων, στη μείωση σφαλμάτων διαχείρισης και στην αύξηση της παραγωγικότητας.

5.2 Κύριες λειτουργίες και δομή

Η Εικονική Πραγματικότητα (Virtual Reality – VR) αποτελεί μία προηγμένη τεχνολογία που επιτρέπει στον χρήστη να εισέρχεται και να αλληλεπιδρά με ένα τρισδιάστατο, ψηφιακά δημιουργημένο περιβάλλον. Η λειτουργία της βασίζεται στον συνδυασμό υλικού εξοπλισμού (hardware) και λογισμικού (software), τα οποία συνεργάζονται για τη δημιουργία μιας ρεαλιστικής εμπειρίας.

Η τεχνολογία VR βασίζεται σε συγκεκριμένες λειτουργίες που επιτρέπουν τη δημιουργία ρεαλιστικής εμπειρίας για τον χρήστη.

Δημιουργία εμβύθισης (Immersion): Η εμβύθιση αποτελεί τη βασική λειτουργία του VR και αναφέρεται στην αίσθηση ότι ο χρήστης βρίσκεται πραγματικά μέσα στο εικονικό περιβάλλον. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω τρισδιάστατης απεικόνισης, ήχου και αλληλεπίδρασης σε πραγματικό χρόνο.

Παρακολούθηση κινήσεων: Τα συστήματα VR καταγράφουν τις κινήσεις του κεφαλιού και του σώματος του χρήστη. Με τη χρήση αισθητήρων και καμερών, το σύστημα προσαρμόζει άμεσα το εικονικό περιβάλλον, προσφέροντας ρεαλιστική εμπειρία κίνησης.

Αλληλεπίδραση με το περιβάλλον: Το VR επιτρέπει στον χρήστη να αλληλεπιδρά με αντικείμενα και στοιχεία του εικονικού κόσμου. Ο χρήστης μπορεί να χειρίζεται εργαλεία, να μετακινείται στον χώρο και να εκτελεί ενέργειες που προσομοιώνουν πραγματικές δραστηριότητες.

Προσομοίωση πραγματικών καταστάσεων: Η τεχνολογία VR χρησιμοποιείται για την αναπαράσταση πραγματικών συνθηκών σε ασφαλές περιβάλλον. Μέσω προσομοιώσεων, οι χρήστες μπορούν να εκπαιδεύονται ή να μελετούν καταστάσεις χωρίς κινδύνους ή οικονομικό κόστος.

Συλλογή και ανάλυση δεδομένων: Τα συστήματα VR μπορούν να συλλέγουν πληροφορίες σχετικά με τη συμπεριφορά και τις ενέργειες του χρήστη. Τα δεδομένα αυτά χρησιμοποιούνται για αξιολόγηση, εκπαίδευση και βελτίωση διαδικασιών.

Η δομή του VR αποτελείται από τα παρακάτω βασικά στοιχεία που συνεργάζονται για την επίτευξη της εικονικής εμπειρίας.

Συσκευές απεικόνισης: Οι συσκευές απεικόνισης είναι το βασικότερο στοιχείο της VR και επιτρέπουν στον χρήστη να βλέπει το εικονικό περιβάλλον. Η πιο συνηθισμένη μορφή είναι τα ειδικά κράνη ή γυαλιά εικονικής πραγματικότητας (VR headsets). Τα γυαλιά αυτά διαθέτουν οθόνες υψηλής ανάλυσης και αισθητήρες που παρακολουθούν την κίνηση του κεφαλιού, επιτρέποντας στο σύστημα να προσαρμόζει την εικόνα ανάλογα με την κατεύθυνση που κοιτά ο χρήστης.

Συστήματα εισόδου και αλληλεπίδρασης: Τα συστήματα εισόδου επιτρέπουν στον χρήστη να αλληλεπιδρά με το εικονικό περιβάλλον. Περιλαμβάνουν χειριστήρια, γάντια εικονικής πραγματικότητας, αισθητήρες κίνησης και συσκευές καταγραφής κινήσεων σώματος. Μέσω αυτών των συσκευών ο χρήστης μπορεί να μετακινείται, να αγγίζει αντικείμενα και να εκτελεί ενέργειες μέσα στο εικονικό περιβάλλον.

Υπολογιστικό σύστημα: Το υπολογιστικό σύστημα αποτελεί τον πυρήνα λειτουργίας της VR. Περιλαμβάνει υπολογιστές ή κονσόλες που επεξεργάζονται τα δεδομένα, δημιουργούν τα τρισδιάστατα γραφικά και συντονίζουν τη λειτουργία των συσκευών. Η υψηλή υπολογιστική ισχύς είναι απαραίτητη για την ομαλή και ρεαλιστική απόδοση του εικονικού περιβάλλοντος.

Λογισμικό και εφαρμογές: Το λογισμικό VR είναι υπεύθυνο για τη δημιουργία των εικονικών κόσμων και τη διαχείριση της αλληλεπίδρασης με τον χρήστη. Περιλαμβάνει προγράμματα σχεδιασμού, προσομοιώσεις και εφαρμογές που χρησιμοποιούνται σε διάφορους τομείς, όπως η εκπαίδευση, η ιατρική και η κτηνοτροφία.

Εξοπλισμός που απαιτείται:

- Head-Mounted Displays (HMDs): Δίνουν πλήρη οπτική εμβύθιση στο ψηφιακό περιβάλλον.
- Motion Controllers: Δυνατότητα αλληλεπίδρασης με αντικείμενα ή ζώα στο περιβάλλον VR.
- 3D Cameras & Sensors: Καταγράφουν πραγματικά δεδομένα ζώων για ενσωμάτωση στο VR.
- VR Software Platforms: Διαχειρίζονται δεδομένα προσομοιώνοντας ζώα, περιβάλλον και αλληλεπιδράσεις.

5.3 Παραδείγματα εφαρμογών

Εκπαίδευση Προσωπικού:

Το VR επιτρέπει στους χρήστες να αποκτούν δεξιότητες:

- Ανίχνευση συμπτωμάτων ασθενειών: Μάθηση μέσω παρατήρησης μοτίβων συμπεριφοράς.
- Διαχείριση στρες ζώων: Εκπαίδευση στον εντοπισμό συμπεριφορών άγχους και αλληλεπίδραση για μείωση στρες.
- Διαδικασίες άρμεγμα και σίτιση: Προσομοίωση χωρίς φυσική παρουσία, με μείωση κινδύνου για τα ζώα.

Εκπαίδευση φοιτητών και ερευνητών:

Το VR χρησιμοποιείται επίσης στην εκπαίδευση φοιτητών κτηνιατρικής και ζωικής παραγωγής. Μέσα από εικονικά εργαστήρια μπορούν να μάθουν διαδικασίες χωρίς να χρειάζεται να βρίσκονται σε πραγματικές κτηνοτροφικές μονάδες.

Σχεδιασμός Εγκαταστάσεων και Διαχείριση Χώρων:

Το VR μπορεί να προσομοιώσει διαφορετικές διατάξεις στάβλων, χώρους ανάπαυσης και περιοχές σίτισης.

- Βελτιστοποίηση διαδρομών σίτισης: Ελαχιστοποίηση άγχους ζώων και χρόνος διαχείρισης.
- Δοκιμή διαφορετικών χώρων ανάπαυσης: Αύξηση ευζωίας και παραγωγικότητας.
- Σχεδιασμός νέων εγκαταστάσεων: Μείωση κόστους και χρόνου εφαρμογής χωρίς φυσικές κατασκευές.

Μελέτη και προσομοίωση σεναρίων και συμπεριφορών:

Οι χρήστες μπορούν να δοκιμάσουν στρατηγικές αντιμετώπισης και να παρατηρήσουν αποτελέσματα πριν εφαρμόσουν αλλαγές στην πραγματική φάρμα.

- Δοκιμή αλλαγής τροφής, θερμοκρασίας, διαρρύθμισης στάβλων.
- Μελέτη την συμπεριφοράς των ζώων κατά την σίτιση ή την μετακίνηση.
- Παρακολούθηση αποτελεσμάτων σε VR πριν εφαρμοστούν πραγματικά.
- Διαχείριση κρίσεων όπως: ασθενειών ή επιδημιών στο κοπάδι, ακραίων κλιματικών φαινομένων, όπως ξηρασία ή πλημμύρες, απρόβλεπτων ελλείψεων τροφής ή νερού.

Βελτίωση ευζωίας ζώων:

Το VR χρησιμοποιείται σε πειραματικό επίπεδο για τη βελτίωση της ψυχολογικής κατάστασης των ζώων. Σε ορισμένες περιπτώσεις έχουν χρησιμοποιηθεί ειδικά συστήματα που δημιουργούν χαλαρωτικά περιβάλλοντα για ζώα, μειώνοντας το άγχος και βελτιώνοντας την παραγωγικότητα.

Αξίζει να αναφέρουμε ένα παράδειγμα εφαρμογής VR προσαρμοσμένη στις ανάγκες των βοοειδών, η οποία, αν και φαίνεται να παραπέμπει σε επιστημονική φαντασία, εφαρμόστηκε ήδη σε μια φάρμα στο Ισραήλ. Ένας κτηνοτρόφος προμηθεύτηκε δύο συστήματα εικονικής πραγματικότητας για αγελάδες από ρωσική εταιρεία κατασκευής, αφού παρακολούθησε σχετική παρουσίαση της τεχνολογίας. Η απόφασή του βασίστηκε στην ανάγκη αύξησης της παραγωγής γάλακτος, προκειμένου να αντιμετωπιστεί το αυξημένο κόστος ζωοτροφών.

Τα συστήματα αυτά επιτρέπουν την εικονική μεταφορά των αγελάδων που διαμένουν σε κλειστούς χώρους σε ένα ψηφιακά δημιουργημένο περιβάλλον με ήρεμα και καταπράσινα λιβάδια. Εκτιμάται ότι η εμπειρία αυτή συμβάλλει στη βελτίωση της ψυχολογικής κατάστασης των ζώων. Παράλληλα, ο κτηνοτρόφος αναπαράγει κλασική μουσική στον χώρο του στάβλου κατά τη διάρκεια χρήσης των συσκευών.

Στη φάρμα πραγματοποιήθηκε πιλοτική δοκιμή με σκοπό την αξιολόγηση της επίδρασης της τεχνολογίας στην παραγωγή γάλακτος. Μετά από δέκα ημέρες χρήσης των συσκευών, παρατηρήθηκε αύξηση της ημερήσιας παραγωγής γάλακτος των δύο αγελάδων της δοκιμής κατά περίπου 22% ημερησίως. Επιπλέον, αναφέρθηκε βελτίωση και στην ποιότητα του παραγόμενου γάλακτος.

Σύμφωνα με διαθέσιμες πληροφορίες, οι κατασκευαστές συνεργάστηκαν με κτηνιάτρους στη Ρωσία, προκειμένου να διασφαλιστεί η ασφάλεια των συσκευών για τα ζώα. Τα θετικά αποτελέσματα της δοκιμής οδήγησαν τον παραγωγό στην προμήθεια επιπλέον συστημάτων εικονικής πραγματικότητας. [23]

5.4 Σύγκριση με την παραδοσιακή κτηνοτροφία

Παράμετρος	Παραδοσιακή κτηνοτροφία	VR + Digital Twin
Παρακολούθηση	Περιοδική, περιορισμένη	Συνεχής, σε πραγματικό χρόνο
Εκπαίδευση προσωπικού	Πρακτική σε πραγματικά ζώα	Ασφαλής προσομοίωση σε VR
Σχεδιασμός χώρων	Δοκιμή και λάθη	Προσομοίωση πριν υλοποίηση
Πρόβλεψη κρίσεων	Περιορισμένη	Προβλέψεις με AI και σενάρια
Κόστος	Χαμηλό αρχικό, αυξημένο μακροπρόθεσμα	Υψηλό αρχικό, μείωση μακροπρόθεσμου κόστους

Πλεονεκτήματα:

- Εμβυθιστική εκπαίδευση προσωπικού χωρίς κίνδυνο για τα ζώα.
- Βελτίωση διαχείρισης ζωικού κεφαλαίου και χώρων.
- Πρόβλεψη και αντιμετώπιση κρίσεων σε ασφαλές περιβάλλον.
- Στήριξη αποφάσεων σε συνδυασμό με Digital Twins.
- Αρχικό κόστος υψηλό, αλλά μείωση μακροπρόθεσμου κόστους μέσω βελτιστοποίησης διαδικασιών και παραγωγής.
- Βελτίωση εκπαίδευσης προσωπικού, νέες δεξιότητες και καλύτερη εμπειρία εργασίας.
- Βελτιστοποίηση διαχείρισης χώρων και τροφής, μείωση άσκοπης κατανάλωσης και αποβλήτων.

Προκλήσεις:

- Υψηλό κόστος εξοπλισμού VR και λογισμικού.
- Απαίτηση εξειδικευμένου προσωπικού.
- Κίνδυνος υπερβολικής εξάρτησης από εικονικά σενάρια.
- Απαίτηση συνεχούς συντήρησης και ενημέρωσης των δεδομένων.

Το VR στην κτηνοτροφία, ιδιαίτερα σε συνδυασμό με Digital Twins, προσφέρει:

- Εμβυθιστική και ασφαλή εκπαίδευση προσωπικού.
- Ακριβή διαχείριση ζωικού κεφαλαίου και χώρων.
- Πρόβλεψη και προσομοίωση κρίσεων.
- Βελτίωση παραγωγικότητας, ευζωίας και οικονομικής αποδοτικότητας.

Η τεχνολογία έχει πλέον τη δυνατότητα να μεταμορφώσει τον τρόπο διαχείρισης ζωικού κεφαλαίου, καθιστώντας την κτηνοτροφία πιο βιώσιμη και επιστημονικά υποστηριζόμενη.

Κεφάλαιο 6: Εφαρμογές Herd Management with Digital Twins

Τα Digital Twins μπορούν να θεωρηθούν ως μια νέα φάση στην διαχείριση ζωικού κεφαλαίου. Βασίζονται σε ήδη υπάρχουσες τεχνολογίες στο Internet of Things (IoT) και στην προσομοίωση. Κατά συνέπεια, υπάρχουν πολλές εφαρμογές στον πρωτογενή τομέα, αν και συχνά δεν παρουσιάζονται ως Digital Twins. Ωστόσο, οι περισσότερες από αυτές τις εφαρμογές αποτελούν ακόμη σχετικά βασικές μορφές Digital Twins, εστιάζοντας για παράδειγμα σε ψηφιακές αναπαραστάσεις στο cloud. Πιο προχωρημένες εφαρμογές, όπως εκείνες που περιλαμβάνουν προγνωστικές και κατευθυντικές δυνατότητες σε όλο τον κύκλο ζωής, βρίσκονται ακόμη σε πρώιμο στάδιο ανάπτυξης. Στην ανασκόπηση της βιβλιογραφίας εντοπίσαμε μόνο λίγες διερευνητικές μελέτες και ορισμένες μελέτες περίπτωσης που παρουσιάζουν ένα σύστημα βασισμένο στο IoT ως Digital Twin, χωρίς όμως λεπτομερή αιτιολόγηση ή ορισμό της έννοιας.

Οι Linz et al. (2019) εφάρμοσαν Digital Twins στην ανάπτυξη ρομπότ αγρού, για παράδειγμα για ανάλυση και επεξεργασία καλλιεργειών σε αμπελώνες. Προσομοίωσαν την αυτόνομη συμπεριφορά των ρομπότ σε ένα τρισδιάστατο περιβάλλον χρησιμοποιώντας δεδομένα σε πραγματικό χρόνο και αντικατοπτρίζουν το προσομοιωμένο Digital Twin για να λειτουργεί το πραγματικό ρομπότ. Αυτό οδηγεί σε μικρότερους χρόνους ανάπτυξης, καλύτερη αξιολόγηση της συμπεριφοράς των αισθητήρων και μείωση των απαιτούμενων πειραμάτων στο χωράφι για την αξιολόγηση φαινοτύπων ή τη δοκιμή των επιδράσεων των καλλιεργητικών παρεμβάσεων. [27]

Οι Park et al. (2020) προτείναν ένα σύστημα WSN (Wireless Sensor Network – Ασύρματο Δίκτυο Αισθητήρων) βασισμένο σε πλατφόρμα cloud για την παρακολούθηση ζώων σε φάρμες. Το προτεινόμενο σύστημα κατασκεύασε ένα WSN χρησιμοποιώντας το δικό του πρωτόκολλο και μετέδιδε τα δεδομένα που μετριούνταν από κάθε κόμβο δεδομένων στον κόμβο συλλογής (sink node). Ο κόμβος συλλογής μετέδιδε τα συγκεντρωμένα δεδομένα στην πλατφόρμα cloud χρησιμοποιώντας τεχνολογία επικοινωνίας. [28]

Η πλατφόρμα cloud αποθήκευε τα δεδομένα όλων των κόμβων και δημιουργούσε μια ιστοσελίδα μέσω της οποίας οι διαχειριστές μπορούσαν να τα ελέγχουν σε πραγματικό χρόνο. Ο διαχειριστής της φάρμας μπορούσε να ελέγχει την κατάσταση κάθε ζώου μέσω της ιστοσελίδας και να αναλύει τη συμπεριφορά της ομάδας των ζώων.

Πραγματοποίησαν πειράματα με τη βοήθεια μιας φάρμας χρησιμοποιώντας ζώα. Ως αποτέλεσμα των πειραμάτων, επιβεβαιώθηκε ότι τα δεδομένα μεταδίδονταν και λαμβάνονταν κανονικά. Η ιστοσελίδα επέτρεπε στον διαχειριστή να λαμβάνει πληροφορίες σε πραγματικό χρόνο για την κατάσταση κάθε ζώου, ενώ η τοποθεσία του μπορούσε επίσης να εμφανιστεί σε χάρτη.

Πιο αναλυτικά ο σκοπός της διαμόρφωσης του συστήματος WSN είναι η παράδοση των πληροφοριών που μετρούνται από κάθε κόμβο στην πλατφόρμα cloud. Ένα ζώο που φοράει ένα κολάρο που περιέχει έναν αισθητήρα ορίζεται ως κόμβος. Κάθε κόμβος συλλέγει πληροφορίες τοποθεσίας χρησιμοποιώντας έναν δέκτη GPS σε μια δεδομένη χρονική στιγμή. Καθώς τα ζώα συγκεντρώνονται σε μεγάλους αριθμούς, σχηματίζονται ομάδες και αναδεικνύονται αρχηγοί μεταξύ τους.

Το ζώο που γίνεται ο αρχηγός παραμένει αμετάβλητο. Ο αρχηγός των ζώων επιλέγεται ως ο κεντρικό κόμβος (sink node). Ζώα με ηγετικό ρόλο στην ομάδα του κοπαδιού είχαν προσδιοριστεί εκ των προτέρων από τους διαχειριστές της φάρμας. Τα υπόλοιπα ζώα που δεν είναι αρχηγοί μεταδίδουν δεδομένα προς τους κεντρικούς κόμβους χρησιμοποιώντας επικοινωνία μικρής εμβέλειας και τεχνολογία μετάδοσης δεδομένων με πολλαπλούς κόμβους (multi-hop).

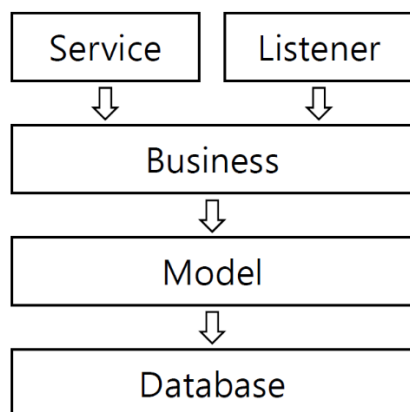
Στο πειραματικό περιβάλλον, χρησιμοποιήθηκε επικοινωνία 3G για τη μετάδοση δεδομένων κόμβων στο cloud. Στο πείραμα, μια μονάδα 3G τοποθετήθηκε στον κεντρικό κόμβο και χρησιμοποιήθηκε ως κόμβος πύλης (gateway node). Τα ζώα στη φάρμα μπορούν να χωριστούν σε αρκετές ομάδες αντί για μία, επειδή κινούνται σε ομάδες ανάλογα με τα χαρακτηριστικά τους. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε απώλεια σύνδεσης με τον κεντρικό κόμβο.

Για να λυθεί αυτό το πρόβλημα, όλα τα ζώα εξοπλίστηκαν με ένα κολάρο με μονάδα επικοινωνίας 3G. Αυτό επιτρέπει σε προσωρινούς κόμβους να λειτουργούν ως κεντρικοί κόμβοι όταν ο κανονικός κόμβος δεν είναι διαθέσιμος. Με αυτή τη μέθοδο, οι πληροφορίες που συλλέγονται από τον κόμβο μπορούν να μεταδίδονται σταθερά στο cloud. Οι διαμορφώσεις του WSN μπορεί να γίνουν πολύπλοκες για τη διαχείριση δεδομένων από πολλούς κόμβους. Ωστόσο, οι πλατφόρμες cloud μπορούν να λύσουν αυτό το πρόβλημα.

Στην συγκεκριμένη μελέτη γίνεται χρήση υπολογιστικού νέφους (cloud computing) για την back-end υποδομή του WSN. Οι πλατφόρμες cloud computing παρέχουν υπολογιστική ισχύ, αποθήκευση δεδομένων και εφαρμογές. Επιπλέον, χωρίς τη χρήση σταθμού βάσης στο WSN, οι κεντρικοί κόμβοι (sink nodes) λειτουργούν ως πύλες (gateways) για την απευθείας αποστολή δεδομένων στο cloud. Με το cloud computing, οι διαχειριστές των αγροκτημάτων δεν χρειάζεται να ανησυχούν για πολύπλοκα back-end περιβάλλοντα.

Χρησιμοποιήθηκε η υπηρεσία (Amazon Web Service) (AWS) ως πλατφόρμα cloud. Η AWS της Amazon προσφέρει πολλαπλές υπηρεσίες και έχει πολυεπίπεδη αρχιτεκτονική. Το Σχήμα 3 δείχνει τα επίπεδα στο AWS. Το ανώτερο επίπεδο υπηρεσιών είναι το σημείο εκκίνησης για την επικοινωνία μεταξύ του κόμβου καταβόθρας και της πλατφόρμας cloud. Το επίπεδο “listener” εκτελεί περιοδικά συγκεκριμένες εργασίες στο σύστημα στο cloud. Για παράδειγμα, στο τέλος της ημέρας, σε βάση 24 ωρών, υπολογίζει την απόσταση που διανύθηκε από κάθε ζώο ανά ημέρα.

Το επίπεδο (business layer) αναλύει και επεξεργάζεται τα βήματα για την εκτέλεση διαφόρων εργασιών του συστήματος. Στον κεντρικό κόμβο, τα ακατέργαστα δεδομένα μέτρησης μετατρέπονται σε μορφή JSON. Το κατώτερο επίπεδο που λαμβάνει τα δεδομένα αναλύει αυτά τα δεδομένα τύπου JSON και αποθηκεύει μόνο τις πραγματικές πληροφορίες GPS στη βάση δεδομένων.



Σχήμα 3: Επίπεδα της AWS Cloud platform.

Πηγή: <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/ecticit/article/view/240087/165486>

Επίσης σχεδιάστηκε μια οθόνη διεπαφής χρήστη, Graphical user interface (GUI) που εμφανίζει τις πληροφορίες κατάστασης των κόμβων και τη θέση τους στον χάρτη. Οι πληροφορίες κατάστασης των κόμβων περιλαμβάνουν τον σειριακό αριθμό του hardware, τον αριθμό κόμβου, τον χρόνο της τελευταίας αποστολής δεδομένων, τη χωρητικότητα της μπαταρίας και τα σήματα.

Το τρέχον GUI αποτελείται από διαδικτυακές εφαρμογές που εφαρμόζουν το πρότυπο σχεδίασης Model-View-Controller (MVC). Χρησιμοποιήθηκε η μορφή δεδομένων JSON για την επικοινωνία εντός του συστήματος cloud και των web εφαρμογών. Η ιστοσελίδα διαχείρισης ανανεώνεται αυτόματα κάθε τρία λεπτά και μπορεί επίσης να ανανεωθεί χειροκίνητα από τον διαχειριστή. Οι ερευνητές του άρθρου για να επαληθεύσουν την λειτουργία του προτεινόμενου συστήματος, πραγματοποίησαν πειράματα σε κτηνοτροφικές φάρμες στην περιοχή.

Στο πρώτο πείραμα, χρησιμοποίησαν συνολικά πέντε κόμβους, οι οποίοι αποτελούνταν από 2 κεντρικούς κόμβους (sink nodes) και 3 κανονικούς κόμβους. Επιλέχτηκε μια ομάδα αγελάδων που περιλάμβανε πέντε αγελάδες και τοποθετήθηκε ένα κολάρο στον λαιμό κάθε αγελάδας. Με τη χρήση αυτών των κολάρων συλλέχτηκαν πληροφορίες θέσης GPS και πληροφορίες μπαταρίας. Αυτές οι πληροφορίες μεταδίδονταν κάθε 15 λεπτά, προκειμένου να παρακολουθούνται οι συνήθειες κίνησης των αγελάδων και να παρατείνεται η διάρκεια ζωής των μπαταριών.

Στα πειράματα της φάρμας, μόνο δύο από τους πέντε κόμβους είχαν ενεργοποιημένες μονάδες 3G/4G ώστε να χρησιμοποιούνται ως κεντρικοί κόμβοι (sink nodes). Οι υπόλοιποι τρεις κόμβοι χρησιμοποιήθηκαν ως κανονικοί κόμβοι και αποθήκευαν προσωρινά (buffer) τα δεδομένα που συλλέγονταν όταν ο κόμβος καταβόθρας δεν ήταν διαθέσιμος.

Για την ανάλυση του ποσοστού σύνδεσης μεταξύ των κόμβων χρησιμοποιήθηκαν συνολικά δεδομένα 12 ωρών, με 6 ώρες κατά τη διάρκεια της ημέρας και 6 ώρες το βράδυ. Κατά τη διάρκεια της ημέρας, οι κόμβοι παρέμεναν συνδεδεμένοι με τους κόμβους καταβόθρας για περίπου 342 λεπτά (περίπου 95%) από τα 360 λεπτά. Επιπλέον, κατά τη διάρκεια της νύχτας, η σύνδεση μεταξύ των κανονικών (mesh nodes) κόμβων και του κεντρικού κόμβου (sink node) ήταν 100%, επειδή οι αγελάδες βρίσκονταν όλες μαζί στον στάβλο. Όπως φάνηκε από το πείραμα η μέγιστη εμβέλεια μετάδοσης/λήψης της μονάδας επικοινωνίας είναι 20 μέτρα. Το γεγονός αυτό δείχνει ότι οι αγελάδες ζουν και κινούνται μαζί για το μεγαλύτερο μέρος της ημέρας.

Στο 2^ο πείραμα αποφάσισαν να αποθηκεύσουν πληροφορίες GPS κάθε τρία λεπτά και να έχουν ενεργοποιημένη τη μονάδα GPS συνεχώς, ώστε να συλλέγονται όσο το δυνατόν περισσότερα δεδομένα για τα ζώα. Χρησιμοποιήθηκαν τα βοοειδή της φάρμας και επέλεξαν δύο από τις 58 αγελάδες. Το πείραμα πραγματοποιήθηκε για δύο ημέρες και η συλλογή δεδομένων συνεχίστηκε μέχρι να εξαντληθούν όλες οι μπαταρίες των κόμβων που ήταν τοποθετημένοι στις αγελάδες.

Οι δύο αγελάδες έχουν ελαφρώς διαφορετικές αποστάσεις και βρίσκονται σε διαφορετικές θέσεις, αλλά συγκεντρώνονται ξανά για να ζήσουν ως ομάδα. Την δεύτερη ημέρα, οι δύο αγελάδες ζουν σε ομάδες από την αρχή της βόσκησης μέχρι να επιστρέψουν στον στάβλο το βράδυ.

Η ύπαρξη τέτοιων πληροφοριών για τα βοοειδή επιτρέπει την αναγνώριση ανώμαλων ενδείξεων, όταν οι αγελάδες μιας ομάδας διαφέρουν σημαντικά ως προς την απόσταση που διανύουν σε σύγκριση με τις άλλες αγελάδες. [28]

Στη συνέχεια θα αναφερθούμε στην έρευνα των Symeonaki et al. [29] σχετικά με τις πρόσφατες εφαρμογές των Digital Twins στα συστήματα ζωικής παραγωγής, όπου η πλειονότητά τους επικεντρώθηκε κυρίως, αλλά όχι αποκλειστικά, στην ευζωία και τη διαχείριση των ζώων, ενώ τα πιο συγκεκριμένα είδη ζώων που παρουσίασαν ενδιαφέρον ήταν τα γαλακτοπαραγωγά βοοειδή και οι χοίροι. Ορισμένες από τις συνεισφορές περιλάμβαναν επίσης πεδία εφαρμογής όπως η κτηνοτροφία ακριβείας στη ζωική παραγωγή (PLF), η διαχείριση παραγωγής και η ευφυής παρακολούθηση της κτηνοτροφίας, καθώς και ο έλεγχος του περιβάλλοντος και της ενέργειας σε πραγματικό χρόνο, σε τομείς που σχετίζονται στενά με τον στόχο της ευζωίας και της διαχείρισης των ζώων.

Σε αυτό το πλαίσιο, οι Zhang et al. [30] πρότειναν μια νέα αρχιτεκτονική ψηφιακών διδύμων για αγελάδες που καλύπτει ολόκληρο τον κύκλο ζωής τους, με στόχο τη διαχείριση της παραγωγής γαλακτοπαραγωγών βοοειδών και τη βελτίωση της ευζωίας των ζώων. Για τον σκοπό αυτό, υλοποιήθηκε μια λύση ώστε να δημιουργηθεί η «ψηφιακή σκιά» των αγελάδων, αξιοποιώντας ένα καινοτόμο έξυπνο περιλαίμιο ειδικής κατασκευής που ενσωματώνει υπερευρείας ultra-wideband (UWB) chips και μονάδες αδρανειακής μέτρησης Inertial Measurement Units (IMUs), για τη συλλογή δεδομένων θέσης σε πραγματικό χρόνο και κινήσεων του λαιμού των αγελάδων που βρίσκονται στα στάδια μοσχαριού, δαμάλας και ενήλικου ζώου. Σύμφωνα με αυτή τη λύση, η αρχιτεκτονική χωρίζεται με βάση την αξιοπιστία των δεδομένων σε τρία επίπεδα: ενοποίηση στάβλου, παράγοντας βοσκής και υπολογιστικό νέφος (cloud), ενώ η υλοποίηση αποτελείται από πέντε στρώματα: στρώμα ενοποίησης, στρώμα διαχείρισης δεδομένων και πληροφορίας, στρώμα μοντέλου και προσομοίωσης, στρώμα μερικής λήψης αποφάσεων και στρώμα οπτικοποίησης. Η δοκιμή της λύσης έδειξε την ανθεκτικότητα και την τεχνική εφικτότητα της αρχιτεκτονικής της, έχοντας σημαντική αξία αναφοράς για την ανάπτυξη των ψηφιακών διδύμων στη βιομηχανία ζωικής παραγωγής.

Επιπλέον, οι Han et al. [31] ανέπτυξαν ένα έξυπνο ψηφιακό δίδυμο για τη μοντελοποίηση της κατάστασης των βοοειδών, ενσωματώνοντας ένα νευρωνικό δίκτυο μακράς-βραχείας μνήμης long short-term memory (LSTM), ώστε να ανιχνεύει και να προβλέπει μια σειρά από συμπεριφορικές καταστάσεις των ζώων. Σύμφωνα με αυτή τη λύση, δημιουργείται ένα μοντέλο ψηφιακού διδύμου βοοειδών βασισμένο στη βαθιά μάθηση, αξιοποιώντας δεδομένα αισθητήρων από ένα σύστημα φάρμας IoT, ώστε να παρακολουθείται σε πραγματικό χρόνο ο φυσιολογικός κύκλος των βοοειδών και να προβλέπεται η κατάσταση του επόμενου κύκλου. Με βάση τα αποτελέσματα αξιολόγησης, αν και η ακρίβεια του μοντέλου Digital Twin είναι υψηλή ως προς τη συμπεριφορική κατάσταση για σημαντικό όγκο δεδομένων, φαίνεται ανεπαρκής όταν ο όγκος των δειγμάτων είναι μικρός.

Μια μελέτη σχετικά με τον σχεδιασμό μιας έξυπνης φάρμας χοίρων που ενσωματώνει την έννοια των ψηφιακών διδύμων για τη βελτίωση της ευζωίας των ζώων παρουσιάστηκε από τους Jo et al. στο [32]. Σε αυτό το πλαίσιο, εξετάζεται το πλαίσιο έξυπνων κτηνοτροφικών μονάδων που αποτελείται από δύο επίπεδα, δηλαδή τον ψηφιακό κινητήρα φάρμας και το ψηφιακό πλαίσιο φάρμας, ενώ περιγράφεται συνοπτικά ένα σενάριο υπηρεσίας αυτόνομης λειτουργίας σε κτηνοτροφικές μονάδες, το οποίο μπορεί να εφαρμοστεί εύκολα, ώστε να φανεί ο τρόπος με τον οποίο η φυσική φάρμα αλληλεπιδρά με την ψηφιακή. Όπως αναφέρθηκε, ο σχεδιασμός ήταν προκαταρκτικός και δεν αξιολογήθηκε με πραγματικά αποτελέσματα. Ως επέκταση αυτής της εργασίας, οι Jo et al. πρότειναν ενεργειακό σχεδιασμό για χοιροστάσιο με στόχο την παροχή άνετων συνθηκών διατροφής. Η λύση ενσωματώνει τα ψηφιακά δίδυμα για τη δημιουργία αλληλεπίδρασης μεταξύ φυσικού και εικονικού χοιροστασίου.

Πραγματοποιήθηκαν συγκρίσεις κατανάλωσης ενέργειας με διαφορετικούς συνδυασμούς ανεμιστήρων, οδηγώντας σε αποτελέσματα που δείχνουν την αναμενόμενη κατανάλωση ενέργειας και οδηγίες εγκατάστασης νέων ανεμιστήρων.

Οι Neethirajan S. et al [33] παρουσίασαν την αρχιτεκτονική αναφοράς ενός συστήματος ψηφιακών διδύμων για μια έξυπνη πλατφόρμα ευζωίας ζώων, με στόχο την πρόβλεψη της συμπεριφοράς των ζώων εκτροφής. Η αρχιτεκτονική περιλαμβάνει διασυνδεδεμένα στοιχεία:

- απομακρυσμένους και φορετούς αισθητήρες για συλλογή δεδομένων από τα ζώα
- υπολογιστικούς διακομιστές νέφους για λήψη, αποθήκευση και επεξεργασία δεδομένων
- μοντέλα TN για αναγνώριση προτύπων και μοντέλα μηχανικής μάθησης για προβλέψεις
- διεπαφής χρήστη για παρακολούθηση και αλληλεπίδραση με τις προβλέψεις.

Συγκεκριμένα παρουσιάζεται η διαδικασία μοντελοποίησης συναισθημάτων ζώων μέσω αισθητήρων, καθώς και η ανάπτυξη της ροής επεξεργασίας για ταξινόμηση και εκτίμηση συναισθηματικών καταστάσεων σε πραγματικό χρόνο. Ωστόσο, η λύση αυτή φαίνεται να βρίσκεται ακόμη σε θεωρητικό στάδιο και δεν έχει αξιολογηθεί με πραγματικά αποτελέσματα.

Ένα τρισδιάστατο μοντέλο σε πραγματικό χρόνο ενός στάβλου και των ζώων που φιλοξενεί (με ακριβή εντοπισμό θέσης) αναπτύχθηκε από τους Plamen et al.[34]. Το μοντέλο βασίστηκε σε δεδομένα από συσκευές IoT σύμφωνα με το μοντέλο πέντε τομέων για την αξιολόγηση ευζωίας: φυσικό περιβάλλον, υγεία, ψυχική κατάσταση, συμπεριφορικές αλληλεπιδράσεις και διατροφή. Αναπτύχθηκε επίσης λογισμικό τεχνητής νοημοσύνης για την παρακολούθηση των δεδομένων και την ειδοποίηση όταν οι τιμές υπερβαίνουν προκαθορισμένα όρια. Επιπλέον, παρέχεται πληροφορία για πιθανά προβλήματα και ενέργειες αντιμετώπισης. Τεχνολογίες επαυξημένης (AR) και εικονικής πραγματικότητας (VR) προσφέρουν ταχύτερη εκπαίδευση σε ασφαλές περιβάλλον και μπορούν να χρησιμοποιηθούν από κτηνιάτρους, κτηνοτρόφους και φοιτητές. Η λύση αυτή, όπως φαίνεται, δεν έχει ακόμη παρουσιάσει αποτελέσματα αξιολόγησης.

Τέλος, οι Valero et al. [35] παρουσίασαν ένα εννοιολογικό πλαίσιο για μια κυκλική αλυσίδα εφοδιασμού κρέατος που ενσωματώνει βασικά τεχνολογικά στοιχεία των ψηφιακών διδύμων προς την κατεύθυνση των «μηδενικών αποβλήτων». Η διαχείριση των ζώων ως μέρος της αλυσίδας επιτυγχάνεται μέσω ψηφιακών διδύμων που παρέχουν πληροφορίες για την υγεία και ευζωία των ζώων μέσω παρακολούθησης, πρόβλεψης και επηρεασμού της συμπεριφοράς και των περιβαλλοντικών συνθηκών. Τα φυσικά αντικείμενα περιλαμβάνουν από μεμονωμένα ζώα έως περιβαλλοντικές συνθήκες (θερμοκρασία, υγρασία, φωτισμός κ.λπ.). Το πλαίσιο βρίσκεται σε αρχικό στάδιο και η υλοποίηση και προσομοίωση αποτελούν μελλοντική εργασία.

Επιπλέον, οι Mu et al. [36] εφάρμοσαν έννοιες ψηφιακών διδύμων στην κτηνοτροφία, μέσω μελέτης περίπτωσης σε λιβάδι του Qinghai, για τη δημιουργία αλυσίδας εφοδιασμού ζωικού κεφαλαίου. Η προσέγγιση βασίζεται σε δύο ροές: εμπορική επικοινωνία μεταξύ προμηθευτών και καταναλωτών και σύστημα IT με τρία επίπεδα (φυσικό, δεδομένων και εικονικό).

Τα δεδομένα από αισθητήρες μεταφέρονται στο επίπεδο δεδομένων, όπου επεξεργάζονται και αποθηκεύονται, και στη συνέχεια στο εικονικό επίπεδο, όπου AI και ML παρέχουν ανατροφοδότηση. Στόχος είναι η πρόληψη απωλειών από ακραία καιρικά φαινόμενα και η πρόβλεψη ασθενειών, με ειδοποιήσεις όταν εντοπίζονται ανωμαλίες. Ωστόσο, η λύση δεν έχει ακόμη αξιολογηθεί με πραγματικά αποτελέσματα.

Τέλος, οι Raba et al. [37] πρότειναν ένα υπολογιστικό σύστημα για τον έλεγχο και τη βελτιστοποίηση της αλυσίδας εφοδιασμού ζωοτροφών σε φάρμες, στο πλαίσιο του έργου IoFEED. Η προσέγγιση βασίζεται σε ψηφιακά δίδυμα σε επίπεδο φάρμας, με αισθητήρες για απομακρυσμένη παρακολούθηση αποθεμάτων και χρήση τεχνικών biased-randomization και simheuristic. Τα αποτελέσματα δείχνουν βελτιστοποίηση των διαδικασιών διατροφής των ζώων.

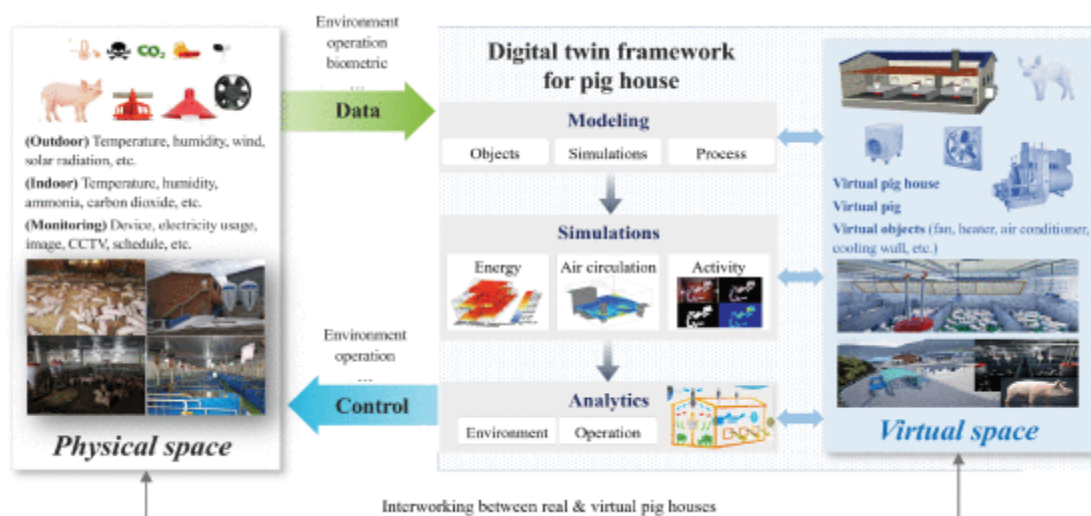
Ένας ακόμη τομέας εφαρμογής των ψηφιακών διδύμων στα συστήματα ζωικής παραγωγής είναι ο έλεγχος περιβάλλοντος και ενέργειας σε πραγματικό χρόνο. Σε αυτό το πλαίσιο, οι Jeong et al. [38] πρότειναν ένα πλαίσιο DTs για υποστήριξη ελέγχου περιβάλλοντος σε πραγματικό χρόνο σε χοιροστάσιο και παρουσίασαν σενάρια ενεργειακής αποδοτικότητας. Δημιουργήθηκε εικονικό χοιροστάσιο και προσομοιώθηκαν συνθήκες με πραγματικά δεδομένα για βελτιστοποίηση ενέργειας. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το μοντέλο μπορεί να υποστηρίξει ενεργειακά αποδοτικό σχεδιασμό και βελτιστοποίηση των συστημάτων HVAC (Heating, Ventilation, and Air Conditioning) σε πραγματική λειτουργία. Στη συνέχεια θα παρουσιάσουμε πιο αναλυτικά την έρευνα τους.

Ο σκοπός της παροχής ψηφιακών διδύμων για χοιροστάσια είναι η υλοποίηση της κτηνοτροφίας ακριβείας. Με την κατασκευή εικονικών χοιροστασίων στον ψηφιακό χώρο, μέσω της αντιστοίχισης υπαρχόντων χοιροστασίων — συμπεριλαμβανομένων όλων των επιμέρους στοιχείων (π.χ. εσωτερικό και εξωτερικό χοιροστασίου, χοίροι, οντότητες αισθητήρων και ελέγχου) — πραγματοποιούνται στον ψηφιακό χώρο διάφορες προσομοιώσεις απαραίτητες για τη διαχείριση του χοιροστασίου. Στη συνέχεια, μετά την ανάλυση των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων, εξάγεται μια εξατομικευμένη μέθοδος ελέγχου του χοιροστασίου.

Ένα χοιροστάσιο περιλαμβάνει συνεχώς μεταβαλλόμενα στοιχεία, καθώς διαχειρίζεται ζωντανούς χοίρους και η συντήρησή του εξαρτάται από τις καιρικές συνθήκες. Επομένως, είναι κρίσιμο να αντιμετωπίζονται τα σφάλματα που προκαλούνται από τη διαφορά μεταξύ των προβλέψεων της προσομοίωσης και των πραγματικών μετρήσεων.

Εκτός από την ψηφιακή αναπαράσταση ενός πραγματικού χοιροστασίου, ένα ψηφιακό δίδυμο παρέχει αλληλεπίδραση μεταξύ του εικονικού και του πραγματικού χώρου, ώστε να συγχρονίζονται και οι δύο χώροι, επιτρέποντας στον εικονικό χώρο να αντικατοπτρίζει την τρέχουσα κατάσταση του πραγματικού χώρου και να ενημερώνει διαδοχικά τις προσομοιώσεις και τα αποτελέσματα. Με αυτόν τον τρόπο, το σφάλμα ελαχιστοποιείται σταδιακά μέσω της επαναλαμβανόμενης αλληλεπίδρασης μεταξύ των δύο χώρων.

Το Σχήμα 4 απεικονίζει το εννοιολογικό πλαίσιο ενός ψηφιακού διδύμου για χοιροστάσιο, το οποίο περιλαμβάνει δύο χώρους: το πραγματικό και το εικονικό χοιροστάσιο. Ένα πραγματικό χοιροστάσιο και ένα ψηφιακό χοιροστάσιο που υποδηλώνει έναν χώρο όπου το πραγματικό χοιροστάσιο αναπαρίσταται εικονικά.



Σχήμα 4: Εννοιολογικό πλαίσιο ενός ψηφιακού διδύμου για χοιροστάσιο.

Πηγή: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/10246265/figures#figures>

Το πλαίσιο του ψηφιακού διδύμου, το οποίο περιλαμβάνει ένα εικονικό χοιροστάσιο, συλλέγει πληροφορίες σχετικά με παραμέτρους όπως το περιβάλλον, η λειτουργία και τα βιομετρικά δεδομένα από ένα πραγματικό χοιροστάσιο. Οι πληροφορίες αυτές συλλέγονται είτε περιοδικά είτε μη περιοδικά, ανάλογα με την εκάστοτε κατάσταση.

Το πλαίσιο αποτελείται από τρεις λογικές λειτουργίες: τη μοντελοποίηση, τις προσομοιώσεις και την ανάλυση, οι οποίες διασυνδέονται με το εικονικό χοιροστάσιο. Η μοντελοποίηση ορίζει τη διαδικασία δημιουργίας ενός μοντέλου δεδομένων για: τα αντικείμενα μέσα σε ένα χοιροστάσιο, τις προσομοιώσεις που παρέχονται από το συγκεκριμένο πλαίσιο και τον κύκλο ζωής που συνδυάζει κάθε διαδικασία σχετική με την ανάπτυξη των χοίρων.

Η ανάλυση εξετάζει τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων από περιβαλλοντική και λειτουργική σκοπιά και παρέχει μια εξατομικευμένη λύση για τον έλεγχο του χοιροστασίου, αξιοποιώντας πληροφορίες πρόβλεψης για τη συγκεκριμένη λύση.

Η εμπορική κτηνοτροφία αποσκοπεί στη μεγιστοποίηση του κέρδους από προϊόντα ζωικής προέλευσης, μέσω της διαχείρισης της σύνθετης διαδικασίας εξισορρόπησης του κόστους ζωοτροφών και ενέργειας. Η ενέργεια αποτελεί ένα από τα βασικά λειτουργικά έξοδα στην κτηνοτροφία για τη διαχείριση του περιβάλλοντος εκτροφής.

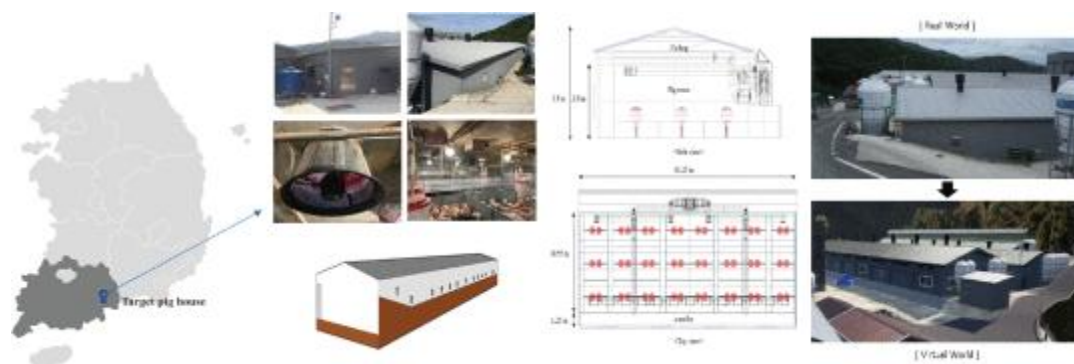
Επιπλέον, οι κτηνοτρόφοι χρησιμοποιούν λέβητες τον χειμώνα και συστήματα ψύξης το καλοκαίρι, ώστε να διατηρούν σταθερή την εσωτερική θερμοκρασία παρά τις συνεχώς μεταβαλλόμενες καιρικές συνθήκες. Οι Licharz et al. [39] εξέτασαν την χρήση αντλιών θερμότητας υπόγειων υδάτων σε χοιροστάσια για τη διαχείριση της ενεργειακής κατανάλωσης. Το βασικό ενδιαφέρον των κτηνοτρόφων είναι η μείωση της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας από τις ενεργοβόρες εγκαταστάσεις, διατηρώντας παράλληλα ένα άνετο περιβάλλον εκτροφής.

Οι ερευνητές του άρθρου πραγματοποίησαν διάφορες μελέτες ενεργειακής προσομοίωσης σε πραγματικό περιβάλλον χοιροστασίου, ώστε να διερευνηθεί η επίδραση των εφαρμογών ψηφιακού διδύμου.

Μοντελοποίηση για το Ψηφιακό Χοιροστάσιο.

Διάφορες οντότητες που συνθέτουν ένα χοιροστάσιο μοντελοποιούνται προκειμένου να δημιουργηθεί ένα χοιροστάσιο στον ψηφιακό χώρο. Για τη διερεύνηση της επίδρασης ενός ψηφιακού διδύμου όσον αφορά την ενεργειακή ανάλυση, οι ερευνητές χρησιμοποίησαν τα λογισμικά προσομοίωσης EnergyPlus [40] και OpenStudio [41], τα οποία χρησιμοποιούνται ευρέως για προσομοιώσεις ενεργειακής απόδοσης κτιρίων, Building Energy Simulations (BES).

Στόχος της ανάπτυξης του μοντέλου ήταν ένα κλειστού τύπου χοιροστάσιο που βρίσκεται στο Suncheon της Δημοκρατίας της Κορέας, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 5. Αποτελείται από δύο θαλάμους ανάπτυξης νεαρών χοίρων και έναν θάλαμο θεραπείας· περίπου 900 χοιρίδια παραμένουν σε κάθε θάλαμο ανάπτυξης για 7–10 εβδομάδες, διάστημα κατά το οποίο το βάρος τους αυξάνεται από 7 έως 25 kg. Η εσωτερική θερμοκρασία του αέρα διατηρούνταν μεταξύ 26–30°C με τη χρήση ανεμιστήρων εξαερισμού και πάνελ ακτινοβολούμενης θέρμανσης Heating Radiant Panel (HRP). Η παρούσα μελέτη χρησιμοποίησε πραγματικά δεδομένα από το συγκεκριμένο χοιροστάσιο για την ανάπτυξη ενός μοντέλου BES για κτηνοτροφικές εγκαταστάσεις, ενώ ο χώρος εφαρμογής του χοιροστασίου παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.



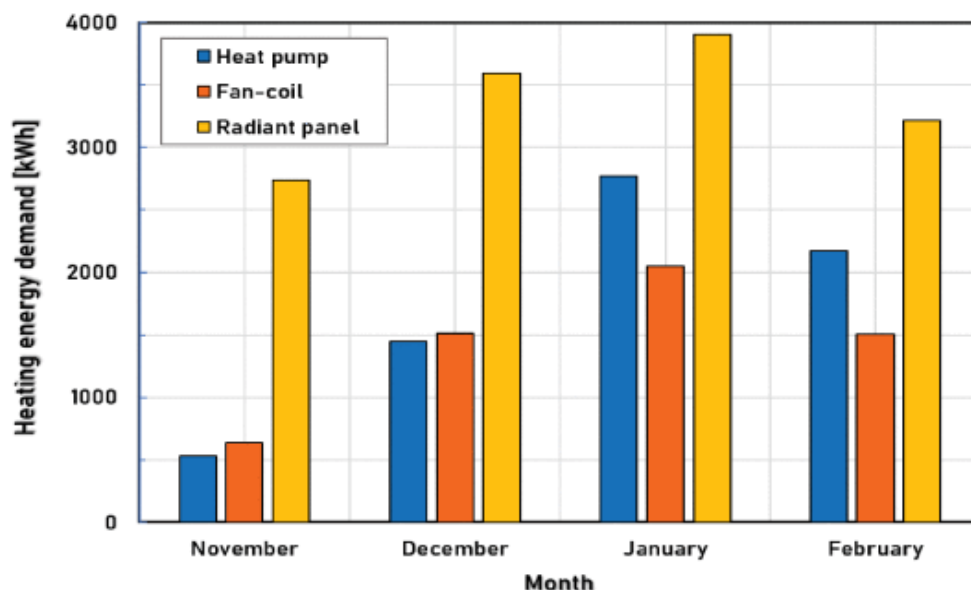
Σχήμα 5: Ενεργειακή μοντελοποίηση μιας πραγματικής χοιροτροφικής μονάδας.

Πηγή: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/10246265/figures#figures>

Σενάριο 1: Εκτίμηση της Ενεργειακής Κατανάλωσης για Εικονικά Αντικείμενα

Η θέρμανση ενός χοιροστασίου, ιδιαίτερα κατά τη χειμερινή περίοδο, αποτελεί πρωταρχικό ζήτημα για τη διατήρηση άνετων εσωτερικών θερμοκρασιών για τους χοίρους σε συνθήκες ψυχρού καιρού. Οι ερευνητές πραγματοποίησαν προσομοίωση σε ένα ψηφιακό χοιροστάσιο σχετικά με την ενεργειακή απαίτηση για τη θέρμανση του χοιροστασίου, χρησιμοποιώντας διαφορετικά συστήματα HVAC κατά το διάστημα από 1 Νοεμβρίου 2020 έως 28 Φεβρουαρίου 2021, λαμβάνοντας υπόψη θερμοκρασία ρύθμισης αέρα στους 28°C, προκειμένου να διερευνηθεί ο βαθμός κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας και ισχύος ανά μήνα. Εξετάστηκαν τα ακόλουθα συστήματα HVAC: αντλίες θερμότητας, μονάδες fan coil και συστήματα ακτινοβολούμενων πάνελ θέρμανσης. Η ισχύς κάθε συστήματος εφαρμόστηκε με χρήση της λειτουργίας αυτόματης διαστασιολόγησης (autosizing) του προσομοιωτή EnergyPlus.

Οι μηνιαίες ενεργειακές απαιτήσεις των εφαρμοζόμενων συστημάτων HVAC προσομοιώθηκαν σε ένα ψηφιακό χοιροστάσιο που διαλειτουργούσε με ένα φυσικό χοιροστάσιο, και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχήμα 6. Η συνολική ενεργειακή απαίτηση για ολόκληρη την περίοδο ήταν υψηλότερη για τα ακτινοβολούμενα πάνελ θέρμανσης (13.447,3 kWh), ακολουθούμενη από την αντλία θερμότητας (6.916,69 kWh) και τη μονάδα fan-coil (5.697,25 kWh). Η ενεργειακή απαίτηση των ακτινοβολούμενων πάνελ θέρμανσης ήταν περίπου 2,3 φορές υψηλότερη από εκείνη της μονάδας fan-coil. Η ενεργειακή απαίτηση της αντλίας θερμότητας ήταν ελαφρώς χαμηλότερη από εκείνη της μονάδας fan-coil τον Νοέμβριο και τον Δεκέμβριο, ενώ η μονάδα fan-coil αποδείχθηκε πιο ενεργειακά αποδοτική τον Ιανουάριο και τον Φεβρουάριο, όταν οι καιρικές συνθήκες ήταν οι ψυχρότερες.



Σχήμα 6: Θερμικές ενεργειακές απαιτήσεις διαφορετικών συστημάτων HVAC.

Πηγή: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/10246265/figures#figures>

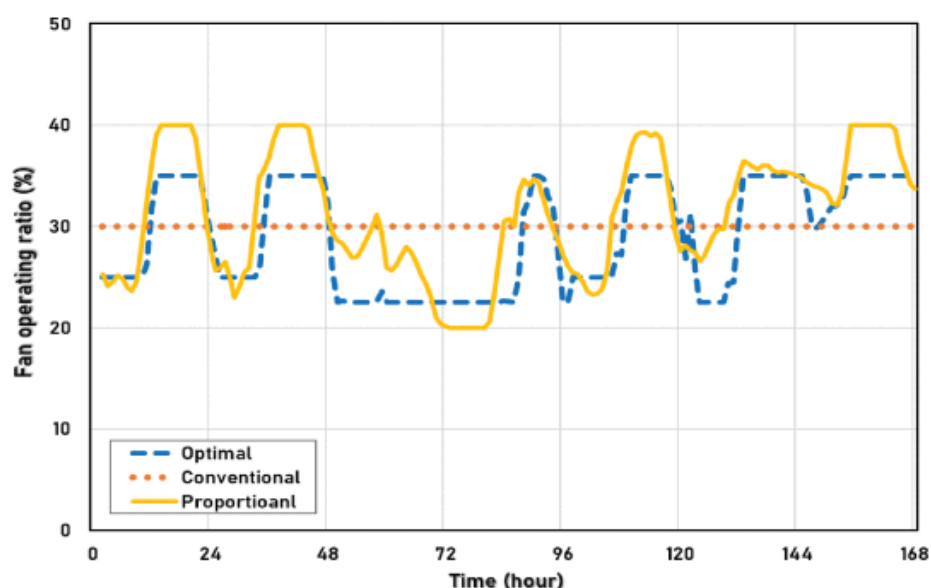
Σενάριο 2: Βέλτιστη Στρατηγική Λειτουργίας

1) Ανεμιστήρας Εξαερισμού

Το συγκεκριμένο σενάριο αποσκοπεί στη διερεύνηση μιας βέλτιστης στρατηγικής λειτουργίας για τους ανεμιστήρες εξαερισμού. Αρχικά, τα δεδομένα πρόγνωσης καιρού για την επόμενη ημέρα (τα οποία συνήθως ανακοινώνονται στις 23:00) εφαρμόστηκαν στο μοντέλο BES. Στη συνέχεια, το βέλτιστο πρόγραμμα λειτουργίας του συστήματος εξαερισμού καθορίζεται μέσω ανάλυσης προσομοίωσης βελτιστοποίησης, χρησιμοποιώντας ως αντικειμενική συνάρτηση την κατανάλωση ενέργειας. Στη μελέτη αυτή, τα μετεωρολογικά δεδομένα ενημερώνονταν κάθε 24 ώρες με βάση τα βραχυπρόθεσμα προγνωστικά δεδομένα καιρού της πόλης Suncheon, ενώ οι ερευνητές χρησιμοποίησαν 4 τύποι μετεωρολογικών δεδομένων: θερμοκρασία, σχετική υγρασία, διεύθυνση ανέμου και ταχύτητα ανέμου.

Το Σχήμα 7 παρουσιάζει το βέλτιστο πρόγραμμα λειτουργίας του ανεμιστήρα εξαερισμού, το οποίο προέκυψε από το ωριαίο μοντέλο BES για την περίοδο 1–7 Ιουλίου 2021, καθώς και το πραγματικό πρόγραμμα λειτουργίας στο αντίστοιχο χοιροστάσιο. Το μοντέλο BES εξάγει το βέλτιστο πρόγραμμα λειτουργίας λαμβάνοντας υπόψη τα δεδομένα πρόγνωσης καιρού και τη μερική απόδοση φορτίου του ανεμιστήρα εξαερισμού. Στην περίπτωση του αναλογικού ελέγχου, ο λόγος λειτουργίας του ανεμιστήρα ρυθμίζεται με βάση την τρέχουσα τιμή της εσωτερικής θερμοκρασίας, χωρίς να λαμβάνονται υπόψη οι προβλεπόμενες καιρικές συνθήκες. Σε αυτό το σενάριο, πραγματοποιήθηκε προσομοίωση εφαρμόζοντας τη στρατηγική βέλτιστου ελέγχου στο ενεργειακό μοντέλο για κάθε ημέρα.

Η προσομοιωμένη κατανάλωση ενέργειας και το εσωτερικό θερμικό περιβάλλον συγκρίθηκαν με εκείνα της συμβατικής μεθόδου λειτουργίας μιας εγκατάστασης χοιροστασίου. Το Σχήμα 7 παρουσιάζει την κατανομή της εσωτερικής θερμοκρασίας για κάθε μέθοδο λειτουργίας κατά τη διάρκεια της εξεταζόμενης περιόδου. Η πραγματική εσωτερική θερμοκρασία, η οποία προέκυψε από τη συμβατική μέθοδο λειτουργίας, ήταν κατά μέσο όρο 30,53°C, ενώ μόνο το 17,86% της συνολικής περιόδου ικανοποιούσε το καθορισμένο εύρος θερμοκρασίας (26–30°C). Αντίθετα, όταν εφαρμόστηκε το βέλτιστο πρόγραμμα λειτουργίας, η μέση εσωτερική θερμοκρασία ήταν 28,08°C και το επιθυμητό εύρος θερμοκρασίας διατηρήθηκε στο 88,69%. Στην περίπτωση του αναλογικού ελέγχου (Proportional control), η μέση εσωτερική θερμοκρασία ήταν 28,39°C και το καθορισμένο εύρος θερμοκρασίας ικανοποιήθηκε στο 82,14% της συνολικής περιόδου.

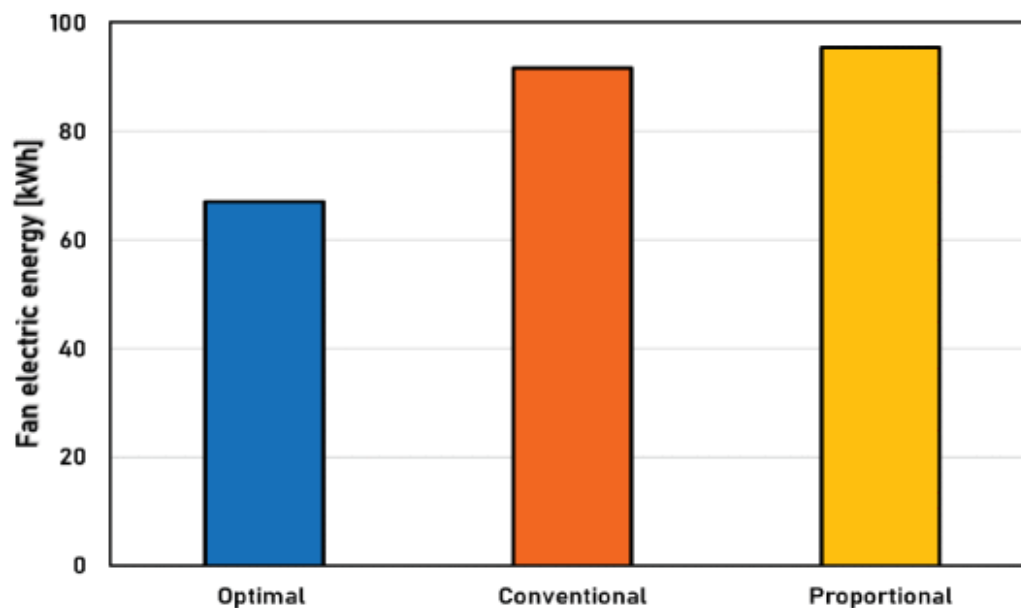


Σχήμα 7: Σύγκριση των βέλτιστων και των συμβατικών προγραμμάτων λειτουργίας των ανεμιστήρων εξαερισμού.

Πηγή: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/10246265/figures#figures>

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η βέλτιστη στρατηγική λειτουργίας που προέκυψε από το ενεργειακό μοντέλο μπορεί να διατηρεί την εσωτερική θερμοκρασία της κτηνοτροφικής εγκατάστασης με πιο σταθερό τρόπο σε σύγκριση με τη συμβατική μέθοδο λειτουργίας και τον αναλογικό έλεγχο.

Το Σχήμα 8 παρουσιάζει την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας των ανεμιστήρων εξαερισμού για τις διαφορετικές μεθόδους λειτουργίας. Η συμβατική μέθοδος κατανάλωσε 91,55 kWh και η μέθοδος αναλογικού ελέγχου κατανάλωσε 95,41 kWh ηλεκτρικής ενέργειας. Αντίθετα, η βέλτιστη μέθοδος λειτουργίας κατανάλωσε 67,01 kWh, επιτυγχάνοντας μείωση της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας κατά 26,80% σε σύγκριση με τη συμβατική μέθοδο και κατά 29,77% σε σύγκριση με τον αναλογικό.



Σχήμα 8: Κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας του ανεμιστήρα εξαερισμού για κάθε μέθοδο λειτουργίας.

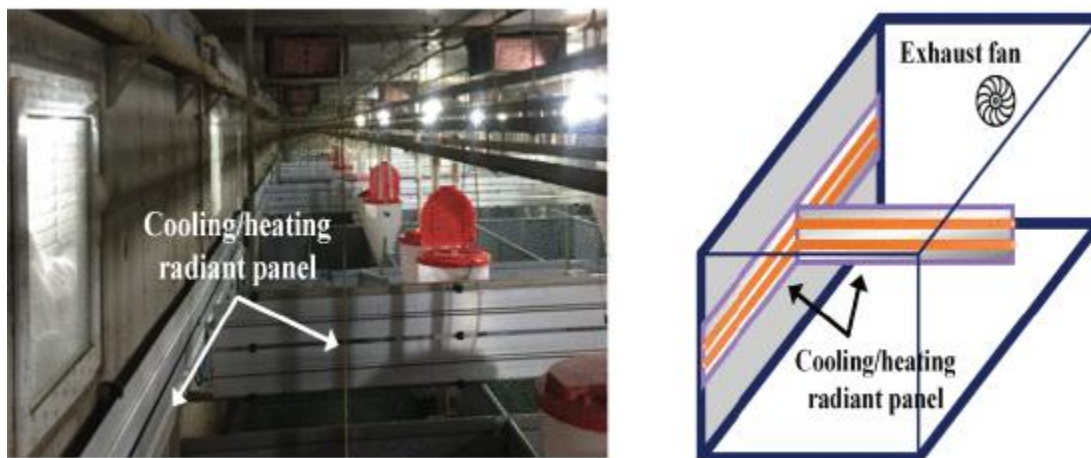
Πηγή: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/10246265/figures#figures>

Επομένως, είναι δυνατό να εξαχθεί μια ενεργειακά αποδοτική στρατηγική λειτουργίας του μηχανικού συστήματος εξαερισμού, διατηρώντας παράλληλα την εσωτερική θερμοκρασία εντός αποδεκτών ορίων. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι, σε αντίθεση με τη συμβατική μέθοδο και τον αναλογικό έλεγχο, οι οποίοι δεν λαμβάνουν υπόψη τις καιρικές συνθήκες, το μοντέλο BES μπορεί να προσφέρει μια ενεργειακά αποδοτική στρατηγική ελέγχου που ενσωματώνει τις εκάστοτε καιρικές συνθήκες.

Συνοψίζοντας για αυτό το σενάριο διερευνάται η βέλτιστη στρατηγική λειτουργίας των ανεμιστήρων εξαερισμού σε ένα χοιροστάσιο. Ωστόσο, η βέλτιστη στρατηγική που προκύπτει από το πλαίσιο του ψηφιακού διδύμου δεν αποτελεί πάντοτε μια ενεργειακά αποδοτική λύση, εξαιτίας απρόβλεπτων καταστάσεων που σχετίζονται με την εκτροπή ζωντανών οργανισμών (δηλαδή των χοίρων). Αναλύει τη διαφορά μεταξύ της πρόβλεψης στον ψηφιακό χώρο και των μετρήσεων στον φυσικό χώρο και ενημερώνει τα BES.

2) Πάνελ Ακτινοβολούμενης Θέρμανσης

Εκτός από τους ανεμιστήρες εξαερισμού της προηγούμενης ενότητας, τα πάνελ ακτινοβολούμενης θέρμανσης (HRP) αποτελούν έναν από τους κρίσιμους ενεργοποιητές κατά τη χειμερινή περίοδο σε ένα χοιροστάσιο. Το Σχήμα 9 παρουσιάζει τα πραγματικά HRP που έχουν εγκατασταθεί στην κτηνοτροφική μονάδα, καθώς και το διάγραμμα προσομοίωσής τους. Σε αυτόν τον τύπο HRP, η θερμότητα από το νερό που ρέει μέσα στον σωλήνα μεταφέρεται σε αλουμινένια πτερύγια (pins) προσαρτημένα στον σωλήνα και στη συνέχεια ακτινοβολείται στον χώρο. Καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία του νερού, αυξάνεται και η θερμαντική απόδοση.



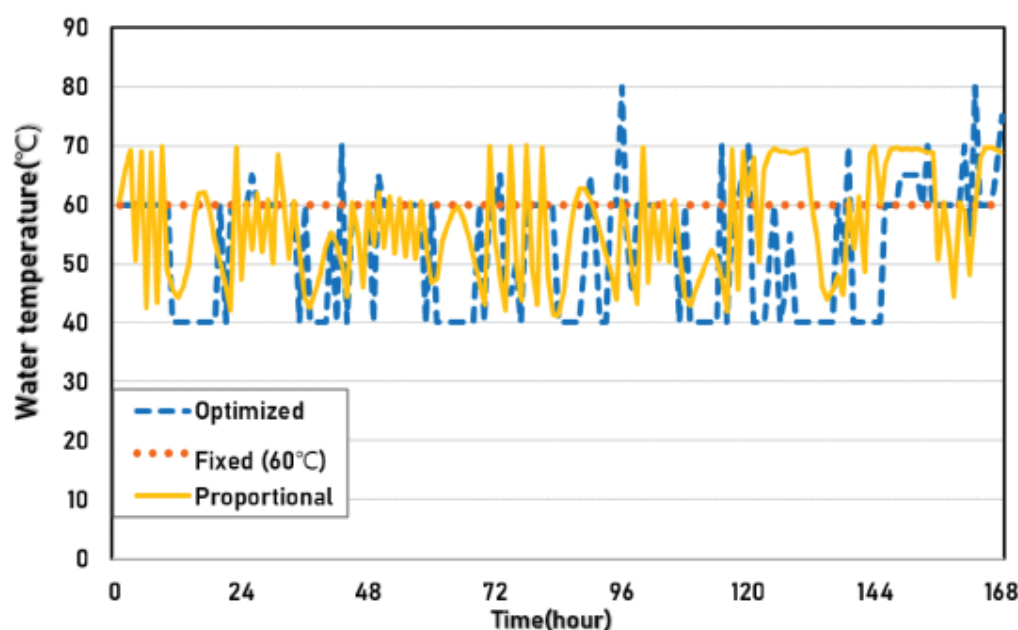
Σχήμα 9: Σύστημα πάνελ ακτινοβολούμενης ψύξης και θέρμανσης εγκατεστημένο στον χοιροστάσιο.

Πηγή: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/10246265/figures#figures>

Επομένως, αναλύθηκε το δυναμικό εξοικονόμησης ενέργειας με την εφαρμογή βέλτιστου ελέγχου της θερμοκρασίας του νερού των πάνελ, χρησιμοποιώντας το αναπτυγμένο μοντέλο BES. Για τον σκοπό αυτό, εξετάστηκαν δύο περιπτώσεις: η περίπτωση όπου η θερμοκρασία του νερού των πάνελ ήταν σταθερά ρυθμισμένη στους 60°C και η περίπτωση όπου εφαρμόστηκε βελτιστοποιημένο πρόγραμμα θερμοκρασίας βάσει της πρόγνωσης καιρού. Επιπλέον, για την αξιολόγηση της απόδοσης της βέλτιστης λειτουργίας, πραγματοποιήθηκε σύγκριση με τα αποτελέσματα προσομοίωσης όταν εφαρμόστηκε αναλογικός έλεγχος, ο οποίος αυξάνει τη θερμοκρασία του νερού καθώς αυξάνεται η εσωτερική θερμοκρασία.

Το Σχήμα 10 παρουσιάζει το πρόγραμμα θερμοκρασίας ζεστού νερού του θερμαντικού πάνελ που προέκυψε από τα αποτελέσματα βελτιστοποίησης. Η θερμοκρασία του νερού των πάνελ διατηρήθηκε κάτω από τους 60°C για το 89,28% της περιόδου μελέτης. Παρατηρείται επίσης ότι τα προγράμματα διαφέρουν από ημέρα σε ημέρα, γεγονός που σημαίνει ότι το βέλτιστο πρόγραμμα κάθε ημέρας διαφοροποιείται ανάλογα με τις καιρικές συνθήκες.

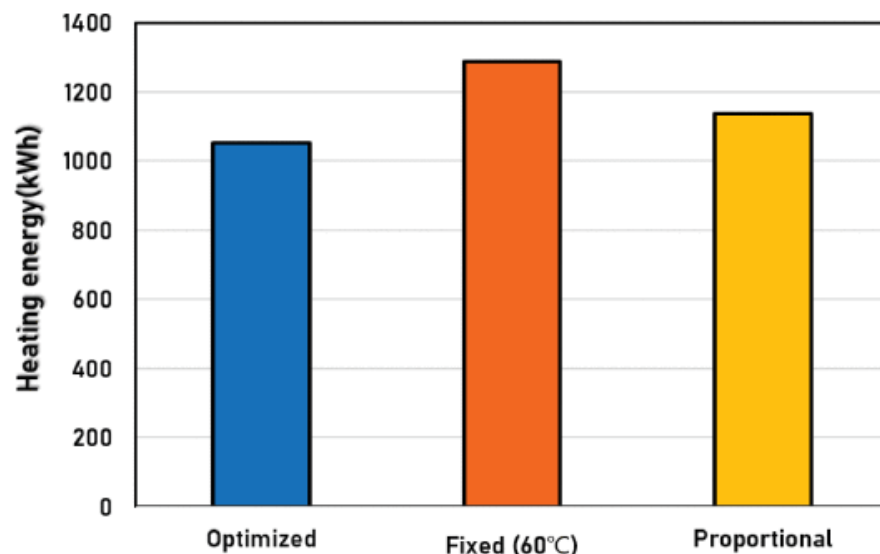
Στην περίπτωση του αναλογικού ελέγχου, η θερμοκρασία του νερού ρυθμίζεται με βάση την τρέχουσα τιμή της εσωτερικής θερμοκρασίας του αέρα, χωρίς να λαμβάνονται υπόψη οι προβλεπόμενες καιρικές συνθήκες.



Σχήμα 10: Βέλτιστο ωριαίο πρόγραμμα λειτουργίας της θερμοκρασίας νερού του πάνελ.

Πηγή: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/10246265/figures#figures>

Το Σχήμα 11 παρουσιάζει την κατανάλωση ενέργειας ανά περίπτωση κατά τη διάρκεια της εξεταζόμενης περιόδου. Όταν η θερμοκρασία του νερού ήταν σταθερά ρυθμισμένη στους 60°C, η συνολική κατανάλωση ενέργειας ήταν 1288,61 kWh. Η μέθοδος αναλογικού ελέγχου κατανάλωσε 1138,61 kWh ηλεκτρικής ενέργειας κατά την ίδια περίοδο. Όταν εφαρμόστηκαν τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης, η κατανάλωση ενέργειας ήταν 18,44% χαμηλότερη σε σχέση με την περίπτωση σταθερής θερμοκρασίας 60°C και 11,64% χαμηλότερη σε σχέση με τον αναλογικό έλεγχο, με τελική τιμή 1051 kWh. Αυτό υποδηλώνει την υψηλή χρησιμότητα της εφαρμογής βελτιστοποίησης της θερμοκρασίας του νερού μέσω ανάλυσης προσομοίωσης, όταν χρησιμοποιείται σύστημα ακτινοβολούμενης θέρμανσης σε μια κτηνοτροφική εγκατάσταση.



Σχήμα 11: Κατανάλωση ενέργειας για θέρμανση για κάθε περίπτωση.

Πηγή: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/10246265/figures#figures>

Οι προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν χρησιμοποιώντας πραγματικά δεδομένα από υφιστάμενο χοιροστάσιο, από ενεργειακή σκοπιά, ώστε να επαληθευτεί η επίδραση του πλαισίου ψηφιακού διδύμου. Τα αποτελέσματα συνοψίζονται ως εξής:

i) Στην περίπτωση των ενεργειακών απαιτήσεων θέρμανσης από το σύστημα HVAC, η μεγαλύτερη κατανάλωση καταγράφηκε στα ακτινοβολούμενα πάνελ θέρμανσης με 13.447,3 kWh, ακολουθούμενα από την αντλία θερμότητας με 6.916,69 kWh και τη μονάδα fan-coil με 5.697,25 kWh.

ii) Όταν εφαρμόστηκε βέλτιστος έλεγχος των ανεμιστήρων εξαερισμού, η κατανάλωση ενέργειας μειώθηκε κατά 26,80% σε σύγκριση με τη συμβατική στρατηγική ελέγχου και κατά 29,77% σε σύγκριση με τον αναλογικό έλεγχο. Επιπλέον, επιβεβαιώθηκε ότι η εσωτερική θερμοκρασία διατηρήθηκε σε κατάλληλο επίπεδο.

Όταν εφαρμόστηκε βέλτιστος έλεγχος των ακτινοβολούμενων πάνελ θέρμανσης, η κατανάλωση ενέργειας μειώθηκε κατά 18,44% σε σύγκριση με την περίπτωση όπου η θερμοκρασία του ζεστού νερού ήταν σταθερή στους 60°C και κατά 11,64% σε σύγκριση με τον αναλογικό έλεγχο. Επιπλέον, παρατηρήθηκε συνολικά σταθερή απόδοση διατήρησης της εσωτερικής θερμοκρασίας. Τα αποτελέσματα της μελέτης αναμένεται να συμβάλουν στη διασφάλιση της βιωσιμότητας της οικονομικής λειτουργίας των κτηνοτροφικών μονάδων μέσω της εξοικονόμησης ενέργειας. Η ανάλυση δυναμικής προσομοίωσης με βάση το ψηφιακό δίδυμο δεν προσφέρει μόνο μια ενεργειακά αποδοτική λύση που μπορεί να εφαρμοστεί στο στάδιο του σχεδιασμού, αλλά εισάγει και πληροφορίες σχετικά με τον βέλτιστο έλεγχο του συστήματος HVAC που μπορεί να εφαρμοστεί στο στάδιο της πραγματικής λειτουργίας.

Κεφάλαιο 7: Συμπέρασμα και προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα

Η κτηνοτροφία δεν αποτελεί πλέον μια παραδοσιακή πρωτογενή βιομηχανία που εξαρτάται μόνο από την εργασία. Η σύγκλιση της ψηφιοποίησης μέσω των Τεχνολογιών Πληροφορικής και Επικοινωνιών (ΤΠΕ) εξελίσσεται προς τη κτηνοτροφία ακριβείας. Η συμβατική «έξυπνη» κτηνοτροφία πραγματοποιούσε κυρίως αυτοματοποίηση και παρακολούθηση μέσω ΤΠΕ. Ωστόσο, στη παρούσα εργασία θεωρήθηκε το ψηφιακό δίδυμο ως βασικός παράγοντας επιτάχυνσης της ψηφιακής κτηνοτροφίας. Προτείνεται ένα πλαίσιο ψηφιακού διδύμου, με στόχο την παροχή άνετων συνθηκών εκτροφής και βέλτιστης λειτουργίας στον κτηνοτροφικό τομέα.

Όπως και στην έρευνα των Jeong et al. [38], αρχικά κατασκευάζεται ένα εικονικό χοιροστάσιο μέσω της αντιστοίχισης ενός φυσικού χοιροστασίου και στη συνέχεια διασυνδέονται τα περιβαλλοντικά δεδομένα μεταξύ των δύο χώρων. Έπειτα πραγματοποιούνται προσομοιώσεις στο εικονικό χοιροστάσιο και τα αποτελέσματα μεταφέρονται στο φυσικό χοιροστάσιο για τη λήψη λειτουργικών αποφάσεων. Η ενέργεια αποτελεί κρίσιμο ζήτημα για την παροχή ενός άνετου περιβάλλοντος για τους χοίρους και για τη μείωση των αντίστοιχων λογαριασμών ηλεκτρικής ενέργειας που απαιτούνται για τη λειτουργία διαφόρων ενεργοποιητών.

Η ψηφιακή κτηνοτροφία θα βοηθήσει τους εμπλεκόμενους να διαχειρίζονται τις φάρμες πιο εύκολα και αποτελεσματικά, παρέχοντας ολοκληρωμένες υπηρεσίες όπως παρακολούθηση του περιβάλλοντος ανάπτυξης του ζωικού κεφαλαίου και πρόβλεψη/διάγνωση περιβάλλοντος, ενέργειας και ασθενειών με βάση τεχνολογίες τεχνητής νοημοσύνης και big data. Για τη βιώσιμη λειτουργία της κτηνοτροφίας, υπό το πρίσμα της κλιματικής κρίσης και των περιβαλλοντικών κανονισμών, η προσέγγιση της έξυπνης κτηνοτροφίας με ψηφιακό δίδυμο αναμένεται να έχει θετικές επιδράσεις στα περιβαλλοντικά ζητήματα και στις εκπομπές άνθρακα, μειώνοντας την απαιτούμενη ενέργεια και διατηρώντας παράλληλα κατάλληλο περιβάλλον εκτροφής.

Σε μελλοντική εργασία θα μπορούσε να γίνει μια προσπάθεια προσωπικής προσομοίωσης για την βελτιστοποίηση της αλληλεπίδρασης μεταξύ των δύο κόσμων όσον αφορά την ακρίβεια των αποτελεσμάτων προσομοίωσης όπου μπορούν να ληφθούν υπόψη βιολογικοί παράγοντες (π.χ. συμπεριφορά, σίτιση) των ζώων στο πλαίσιο του ψηφιακού διδύμου.

Βιβλιογραφία

- [1] Daniel Warner, Elsa Vasseur, Marianne Villettaz Robichaud, Steve Adam, Doris Pellerin, Daniel M. Lefebvre, René Lacroix (2020). *Development of a Benchmarking Tool for Dairy Herd Management*. Animals.
<https://www.mdpi.com/2076-2615/10/9/1689>
- [2] S. Calsamiglia, G. Espinosa, G. Vera, A. Ferret, L. Castillejos (2020). A virtual dairy herd as a tool to teach dairy production and management.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022030220300011>
- [3] Anh Nguyen, Michael Francis, Emma Windfeld, Guillaume Lhermie, Kangsoo Kim (2024). Developing an immersive virtual farm simulation for engaging and effective public education about the dairy industry.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0097849323003059>
- [4] H Hogeveen - European Journal of Livestock & Dairy (2025). Enhancing Dairy Productivity Through Precision Livestock Farming: A Technological Perspective
<https://agriinnovationjournal.com/aij/index.php/ejlds/index>
- [5] Fabio Napolitano, Andrea Bragaglio, Emilio Sabia, Francesco Serrapica, Ada Braghieri, Giuseppe De Rosa (2020). The human–animal relationship in dairy animals.
<https://www.cambridge.org/core/journals/journal-of-dairy-research/article/humananimal-relationship-in-dairy-animals/3C65E8C6A66BDFCBB43CEEA41022CAAA>
- [6] Gerardo Caja, Andreia Castro-Costa, Christopher H. Knight (2016). Engineering to support wellbeing of dairy animals.
<https://www.cambridge.org/core/journals/journal-of-dairy-research/article/engineering-to-support-wellbeing-of-dairy-animals/ADD01DDEE23EA9688F2E332A0D880F12>
- [7] Wolfert S., Ge L., Verdouw C., & Bogaardt M.-J. (2017). Big Data in Smart Farming – A Review. Agricultural Systems.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0308521X16303754>
- [8] C.J. Rutten, W. Steeneveld, A.G.J.M. Oude Lansink, H. Hogeveen (2018). Delaying investments in sensor technology: The rationality of dairy farmers' investment decisions illustrated within the framework of real options theory.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022030218303965>
- [9] Callum R. Eastwood, Alan Renwick (2020). Innovation Uncertainty Impacts the Adoption of Smarter Farming Approaches. <https://www.frontiersin.org/journals/sustainable-food-systems/articles/10.3389/fsufs.2020.00024/full>
- [10] E.A. Eckelkamp PAS (2019). Invited Review: Current state of wearable precision dairy technologies in disease detection.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590286519300333>
- [11] *Welfare Quality Assessment Protocols for Cattle and Sheep*. Welfare Quality Network.
<https://www.welfarequalitynetwork.net/en-us/reports/assessment-protocols/>
- [12] Daniela Lovarelli, Jacopo Bacenetti, Marcella Guarino (2020). A review on dairy cattle farming: Is precision livestock farming the compromise for an environmental, economic and social sustainable production?
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652620314566>

- [13] Horizon Europe.
https://research-and-innovation.ec.europa.eu/funding/funding-opportunities/funding-programmes-and-open-calls/horizon-europe_en
- [14] The European Green Deal.
https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en
- [15] Tangorra F. M., Minero M., & Mattiello S. (2024). Internet of Things (IoT): Sensors Application in Dairy Cattle and Management. *Animals*.
<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11545371/>
- [16] Hajnal É., et al. (2022). Rumen Bolus Developments for Health Monitoring in Dairy Cows. *Sensors*. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9505622/>
- [17] Nielen M., et al. (1992). Electrical Conductivity of Milk: Measurement and Mastitis Detection. *Journal of Dairy Science*.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022030292777984>.
- [18] Antognoli V., et al. (2025). Computer Vision in Dairy Farm Management: A Literature Review. *Animals*.
<https://www.mdpi.com/2076-2615/15/17/2508>.
- [19] Digi4Live project. <https://digi4live.eu/>
- [20] Yongan Zhang, Qian Zhang, Lina Zhang, Jia Li, Meian Li, Yanqiu Liu, Yanyu Shi (2023). Progress of Machine Vision Technologies in Intelligent Dairy Farming.
<https://www.mdpi.com/2076-3417/13/12/7052>
- [21] Konstantinos G. Liakos, Patrizia Busato, Dimitrios Moshou, Simon Pearson, Dionysis Bochtis (2018). Machine Learning in Agriculture: A Review.
<https://www.mdpi.com/1424-8220/18/8/2674>
- [22] Mengyuan Chu, Yongsheng Si, Qian Li, Xiaowen Liu, Gang Liu (2025). Deep learning-based model to classify mastitis in Holstein dairy cows.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1537511025000455>
- [23] Maureen Hanson (2022) Virtual Reality for Cows?.
<https://www.dairyherd.com/news/dairy-production/virtual-reality-cows>
- [24] Elanchezhian Arulmozhi, Nibas Chandra Deb, Niraj Tamrakar, Dae Yeong Kang, Myeong Yong Kang, Junghoo Kook, Jayanta Kumar Basak, Hyeon Tae Kim (2024). From Reality to Virtuality: Revolutionizing Livestock Farming Through Digital Twin.
<https://www.mdpi.com/2077-0472/14/12/2231>
- [25] Barni Andrea, Alessandro Fontana, Silvia Menato, Sorlini, Marzio, Canetta, Luca (2018). Exploiting the Digital Twin in the Assessment and Optimization of Sustainability Performances.
<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8710554>
- [26] Suresh Neethirajan, Bas Kemp (2021). Digital Twins in Livestock Farming.
<https://www.mdpi.com/2076-2615/11/4/1008>
- [27] Cor Verdouw, Bedir Tekinerdogan, Adrie Beulens, Sjaak Wolfert (2021). Digital Twins in smart farming.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0308521X20309070#s0080>
- [28] Jung Kyu Park, Eun Young Park (2020). Monitoring Method of Movement of Grazing Cows using Cloud-Based System.
<https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/ecticit/article/view/240087>

- [29] Eleni Symeonaki, Chrysanthos Maraveas and Konstantinos G. Arvanitis (2024). Recent Advances in Digital Twins for Agriculture 5.0: Applications and Open Issues in Livestock Production Systems.
<https://www.mdpi.com/2076-3417/14/2/686>
- [30] Yi Zhang, Yu Zhang, Meng Gao, Baisheng Dai, Shengli Kou, Xinjie Wang, Xiao Fu, Weizheng Shen (2023). Digital Twin Perception and Modeling Method for Feeding Behavior of Dairy Cows.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0168169923005690>
- [31] Xue Han, Zihuai Lin, Cameron Clark, Branka Vucetic, Sabrina Lomax (2022). AI Based Digital Twin Model for Cattle Caring.
<https://www.mdpi.com/1424-8220/22/19/7118>
- [32] Seng-Kyoun Jo, Dae-Heon Park, Hyeon Park, Se-Han Kim (2018). Smart Livestock Farms Using Digital Twin: Feasibility Study.
<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8539516/authors#authors>
- [33] Suresh Neethirajan, Coleman, K (2022). Affective State Recognition in Livestock—Artificial Intelligence Approaches.
<https://www.mdpi.com/2076-2615/12/6/759>
- [34] Plamen Petrov, Tatiana Atanasova (2021). Digital Twins with Application of AR and VR in Livestock Instructions.
https://www.researchgate.net/profile/Tatiana-Atanasova/publication/357708863_Digital_Twins_with_Application_of_AR_and_VR_in_Livestock_Instructions/links/61e138788d338833e368ec09/Digital-Twins-with-Application-of-AR-and-VR-in-Livestock-Instructions.pdf
- [35] M.R. Valero, B.J. Hicks, A Nassehi (2023). A Conceptual Framework of a Digital-Twin for a Circular Meat Supply Chain.
https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-18326-3_19
- [36] Mengdi Mu a, Yuqing Zhou b, Dengsheng Wu c (2022). Digital Twins on Animal Husbandry: Insights and Application.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877050922020063>
- [37] David Raba , Rafael D. Tordecilla , Pedro Copado , Angel A. Juan , Daniel Mount (2021). A Digital Twin for Decision Making on Livestock Feeding.
<https://pubsonline.informs.org/doi/abs/10.1287/inte.2021.1110>
- [38] Deuk-Young Jeong, Seng-Kyoun Jo, In-Bok Lee, Hakjong Shin, Jun-Gyu Kim (2023). Digital Twin Application: Making a Virtual Pig House Toward Digital Livestock Farming.
<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/10246265>
- [39] Hannah Licharz, Peter Rösmann, Manuel S. Krommweh, Ehab Mostafa, Wolfgang Büscher (2020). Energy Efficiency of a Heat Pump System: Case Study in Two Pig Houses.
<https://www.mdpi.com/1996-1073/13/3/662>
- [40] EnergyPlus <https://energyplus.net/>
- [41] OpenStudio <https://openstudio.net/>