

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΓΕΩΠΟΝΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΠΟΝΙΑΣ ΙΧΘΥΟΛΟΓΙΑΣ & ΥΔΑΤΙΝΟΥ
ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ
Π.Μ.Σ.: «ΜΕΣΟΓΕΙΑΚΗ ΥΔΑΤΟΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ»

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**«Βελτίωση διαχειριστικών πρακτικών εντατικής ιχθυοκαλλιέργειας
με τη χρήση σύγχρονων τεχνολογιών»**

Χρήστος Καλαϊτζίδης

Βόλος, 2023

**«Βελτίωση διαχειριστικών πρακτικών εντατικής ιχθυοκαλλιέργειας με τη χρήση
σύγχρονων τεχνολογιών»**

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή:

1. Παναγιώτα Παναγιωτάκη, Καθηγήτρια – Υδατοκαλλιέργειες, Τμήμα Γεωπονίας Ιχθυολογίας και Υδάτινου Περιβάλλοντος, Σχολή Γεωπονικών Επιστημών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, **Επιβλέπουσα**.

2. Νεοφύτου Νικόλαος, Αναπληρωτής Καθηγητής – Υδατοκαλλιέργειες και Περιβάλλον, Τμήμα Γεωπονίας Ιχθυολογίας και Υδάτινου Περιβάλλοντος, Σχολή Γεωπονικών Επιστημών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, **Μέλος**.

3. Γκολομάζου Ελένη, Αναπληρώτρια Καθηγήτρια – Προστασία - Ευζωία Ιχθύων, Τμήμα Γεωπονίας Ιχθυολογίας και Υδάτινου Περιβάλλοντος, Σχολή Γεωπονικών Επιστημών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, **Μέλος**.

Στην οικογένεια και στους φίλους μου, οι οποίοι με στηρίζουν και με βοηθούν, να βελτιώνομαι σαν άτομο. Επίσης, την αφιερώνω σε όλους όσους με ενέπνευσαν και με στήριξαν κατά τη συγγραφή της.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να εκφράσω τις ειλικρινείς μου ευχαριστίες, σε όλους όσοι συνέβαλαν, στο να φέρω σε πέρας την παρούσα Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία. Ιδιαίτερα, θα ήθελα να ευχαριστήσω την Επιβλέπουσα της εργασίας αυτής, κ. Παναγιωτάκη Παναγιώτα για την πολύτιμη βοήθειά της και τη διαρκή υποστήριξή της, τόσο κατά τη συλλογή και αξιολόγηση των πληροφοριών, όσο και κατά τη συγγραφή της παρούσας εργασίας, καθώς και τα υπόλοιπα μέλη της εξεταστικής επιτροπής μου, αποτελούμενη από τους κ. Νεοφύτου Ν. και κα. Γκολομάζου Ε., για τις χρήσιμες συμβουλές τους και την καθοδήγησή τους καθ' όλα τα στάδια διεκπεραίωσης της εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στην οικογένειά μου για την αμέριστη συμπαράσταση, βοήθεια και προ πάντων κατανόηση και ανοχή καθ' όλο το χρονικό διάστημα των σπουδών μου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι υδατοκαλλιέργειες παράγουν περίπου το 50% των ιχθύων που καταναλώνονται παγκοσμίως. Με την αλιεία να αντιμετωπίζει όλο και μεγαλύτερα προβλήματα, καθώς η αλιευτική πίεση εξαντλεί τα ιχθυοαποθέματα, οι υδατοκαλλιέργειες καλούνται να αυξήσουν ακόμα περισσότερο τη παραγωγή τους, έτσι ώστε να καλύψουν τις όλο και μεγαλύτερες απαιτήσεις του ανθρώπινου πληθυσμού σε ιχθύες. Η αύξηση της παραγωγής θα πρέπει να συνδυάζεται με σωστές συνθήκες διαβίωσης για τους ιχθύες, διατήρηση της τιμής του τελικού προϊόντος σε λογικά πλαίσια, καθώς και με υψηλή ποιότητα του τελικού προϊόντος. Για την επίτευξη αυτών των στόχων μπορούν να παίξουν σημαντικό ρόλο νέες τεχνολογίες όπως η τεχνητή νοημοσύνη (AI), το Internet of Things, τα blockchains κ.ά. Η τεχνητή νοημοσύνη συγκεκριμένα, με τις προεκτάσεις της (Machine Learning, Deep Learning), η οποία ήδη σημειώνει ραγδαία ανάπτυξη και εφαρμογή σε πολλούς κλάδους, δίνει τη δυνατότητα περαιτέρω βελτίωσης στις υδατοκαλλιέργειες. Εφαρμοζόμενη σε προγράμματα τα οποία μπορούν να υπολογίσουν την ένταση της τροφοληψίας σε έναν κλωβό, να αποτυπώσουν τις φυσικοχημικές συνθήκες του περιβάλλοντος, αλλά και να τις προβλέψουν, προσφέροντας συμβουλές για τη διαχείριση της μονάδας. Μπορούν επίσης να συνεισφέρουν στην έγκαιρη αντιμετώπιση ασθενειών στις υδατοκαλλιέργειες, εντοπίζοντας ιχθύες που παρουσιάζουν προβλήματα υγείας, μειώνοντας τον αριθμό των νεκρών ιχθύων κατά την εκτροφή. Οι εξελίξεις αυτές μπορούν να βελτιώσουν ολιστικά την υδατοκαλλιέργεια, εάν συνεχίσει να εξελίσσεται, κάνοντας την ευρεία εφαρμογή ευκολότερη.

Λέξεις κλειδιά: Τεχνητή Νοημοσύνη (AI), Αυτοματοποιημένη υδατοκαλλιέργεια,
Νέες τεχνολογίες, Machine Learning

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
2. ΝΕΑ ΕΡΓΑΛΕΙΑ/ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ	4
2.1. Η ανάγκη της μετάβασης σε νέες τεχνολογίες.....	4
2.2. Νέα εργαλεία και βελτιωμένες πρακτικές.....	7
2.3. Πλεονεκτήματα και δυσκολίες εφαρμογής.....	13
3. ΤΕΧΝΗΤΗ ΝΟΗΜΟΣΥΝΗ.....	18
3.1. Βασικές έννοιες/τύποι τεχνητής νοημοσύνης	18
3.2. Εφαρμογές στην υδατοκαλλιέργεια	25
3.3. Πλεονεκτήματα και δυσκολίες εφαρμογής.....	34
4. ΣΥΖΗΤΗΣΗ	37
5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	39
6. ABSTRACT.....	47

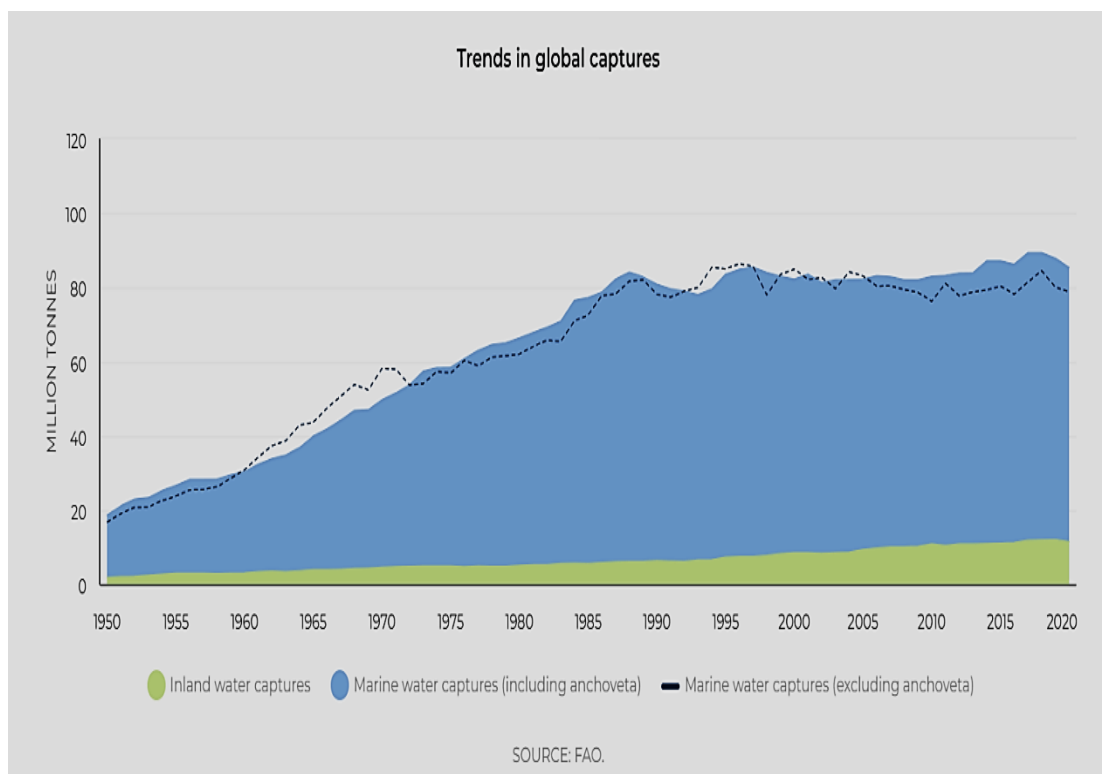
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Με τον ανθρώπινο πληθυσμό να βρίσκεται ήδη στα 8 δισεκατομμύρια άτομα από τον Νοέμβριο του 2022 και η κορύφωση να προβλέπεται στα 10,4 δισεκατομμύρια μέχρι τα μέσα του 2080 (United Nations, 2023), είναι λογικό να αυξηθεί και η απαιτούμενη ποσότητα της παραγόμενης τροφής, συμπεριλαμβανομένων και των ιχθύων. Πέρα όμως από τον ανθρώπινο πληθυσμό, υπάρχουν και άλλοι παράγοντες, οι οποίοι οδηγούν σε αύξηση της κατανάλωσης ιχθύων όπως η αύξηση του βιοτικού επιπέδου, σε συνδυασμό με φαινόμενα όπως η αστικοποίηση, όπου οι άνθρωποι έχουν μεγαλύτερο εισόδημα για να διαθέσουν, καταναλώνοντας έτσι περισσότερους ιχθύες (Ahmad et al., 2021).

Οι δύο κλάδοι οι οποίοι μπορούν να προσφέρουν τους ιχθύες, που επιζητούν οι καταναλωτές είναι η αλιεία και οι υδατοκαλλιέργειες. Δυστυχώς όμως, τα αλιευτικά αποθέματα δεν δείχνουν ικανά, να καλύψουν τις απαιτήσεις αυτές. Οι ιχθύες που προέρχονται από την αλιεία έχουν σταθεροποιηθεί ποσοτικά τα τελευταία χρόνια (Εικ.1.1.) παρά την αύξηση της αλιευτικής προσπάθειας, ενώ η κατανάλωση ιχθύων παρουσιάζει αυξητική τάση, λαμβάνοντας μάλιστα υπόψιν και την αύξηση του πληθυσμού (FAO, 2023).

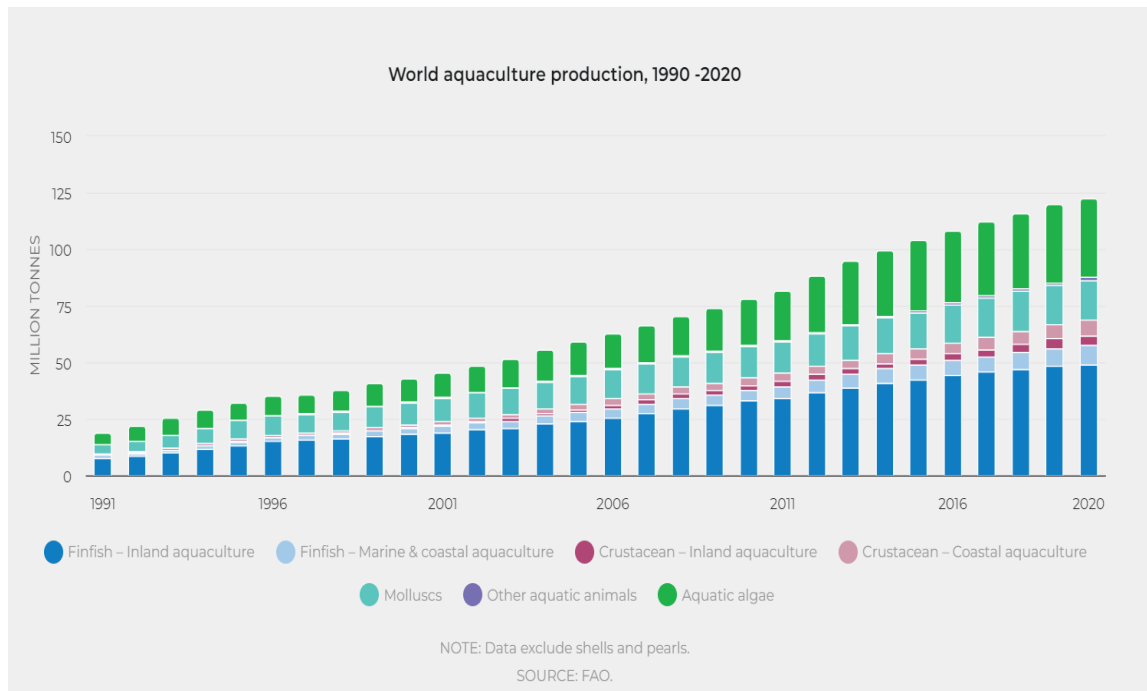
Το κενό έρχεται να καλύψει η υδατοκαλλιέργεια. Η υδατοκαλλιέργεια συνήθως συνδέεται με την εκτροφή ιχθύων, αλλά συμπεριλαμβάνει και άλλες εκτροφές και καλλιέργειες υδρόβιων φυτών και ζώων, όπως καρκινοειδή, μαλάκια, υδρόβια φυτά κ.α. (Ahmad et al., 2021). Καλύπτει έτσι ένα μεγάλο μέρος αναγκών, οι οποίες μπορούν να προκύψουν ανάλογα και με τις διατροφικές συνήθειες του κάθε πολιτισμού. Για το 2020, από τους περίπου 157 εκατομμύρια τόνους ψαριών που διατέθηκαν για

ανθρώπινη κατανάλωση (89% της συνολικής ποσότητας ιχθύων που αλιεύτηκαν ή εκτραφήκαν), το 56% προήλθε από τον κλάδο της ιχθυοκαλλιέργειας (FAO, 2023).



Εικόνα 1.1. Παγκόσμια αλιευτική τάση, από το 1950 μέχρι το 2020 (Πηγή: FAO)

Γίνεται αντιληπτό ότι η υδατοκαλλιέργεια αποκτά πρωτεύοντα ρόλο στην εξασφάλιση των απαιτούμενων ιχθύων για τη παγκόσμια αγορά. Ταυτόχρονα όμως εμφανίζεται και η αναμενόμενη πίεση για τη βελτίωση των παραγωγικών διαδικασιών, έτσι ώστε οι ιχθυοκαλλιέργειες να εκτρέφουν μεγαλύτερες ποσότητες ιχθύων, στο μικρότερο δυνατό χρόνο, με το μικρότερο δυνατό κόστος, εξασφαλίζοντας παράλληλα την ευζωία των εκτρεφόμενων ιχθύων και την άριστη ποιότητα του προϊόντος, που θα φτάσει στον καταναλωτή.



Εικόνα 1.2. Παγκόσμια παραγωγή υδατοκαλλιεργειών, από το 1990 μέχρι το 2020 (Πηγή: FAO)

Για την επιτυχή αύξηση της παραγωγής, εξασφαλίζοντας παράλληλα όλες τις παραμέτρους που αναφέρθηκαν προηγουμένως, είναι αναγκαίο να αναπτυχθούν αλλά και να εφαρμοστούν νέες τεχνολογίες σε όλη τη διάρκεια της παραγωγικής διαδικασίας. Οι τεχνολογίες αυτές μπορεί να είναι βελτιώσεις των υπαρχόντων εργαλείων, που χρησιμοποιούνται στην υδατοκαλλιέργεια ή νέες μέθοδοι που εφαρμόζονται για πρώτη φορά.

2. ΝΕΑ ΕΡΓΑΛΕΙΑ/ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ

2.1. Η ανάγκη της μετάβασης σε νέες τεχνολογίες

Ο κλάδος των υδατοκαλλιεργειών θεωρείται ως γρήγορα αναπτυσσόμενος, χάρη στις καινοτομίες που επιτυγχάνονται, όσον αφορά τα συστήματα παραγωγής (Kumar & Engle, 2016; Guillen et al., 2019). Η ανάπτυξη αυτή έχει οδηγήσει στην αύξηση της παραγωγής και καλείται να συνεχίσει τη βελτίωση του κλάδου.

Για τον λόγο αυτόν αναπτύσσονται συνεχώς νέες τεχνολογίες μέτρησης και ελέγχου, οι οποίες προσφέρουν "έξυπνους" τρόπους διαχείρισης των υδατοκαλλιεργειών (Wei et al., 2020). Η χρήση των τεχνολογιών αυτών μπορεί να συνεισφέρει στη βελτίωση της αποδοτικότητας εργασίας, προσφέροντας σωστή διαχείριση των κινδύνων, εξοικονόμηση τόσο σε απαιτούμενη τροφή όσο και σε ενέργεια, μείωση ασθενειών και θανάτων στους εκτρεφόμενους ιχθύες, πρόληψη καταστροφικών απωλειών, αύξηση παραγωγής και καλύτερες οικονομικές προοπτικές (Karimanzira et al., 2014).

Τα προβλήματα που υπάρχουν είναι ποικίλα και αφορούν διάφορους τομείς κατά τη διάρκεια της παραγωγικής διαδικασίας. Μπορεί να αφορούν κινδύνους σχετικούς με τους εκτρεφόμενους οργανισμούς ή και για τους εργαζομένους της εκάστοτε μονάδας. Μερικά από τα προβλήματα που παρουσιάζονται στις υδατοκαλλιέργειες της Ευρωπαϊκής Ένωσης είναι η δημιουργία μονοπωλίων, το υψηλότερο κόστος παραγωγής σε σχέση με άλλες χώρες, η έλλειψη χώρου, η δυσκολία χρηματοδότησης, οι αυστηρές νομοθεσίες και η περιορισμένη πρόσβαση σε νερό (Bernal-Higueta et al., 2023).

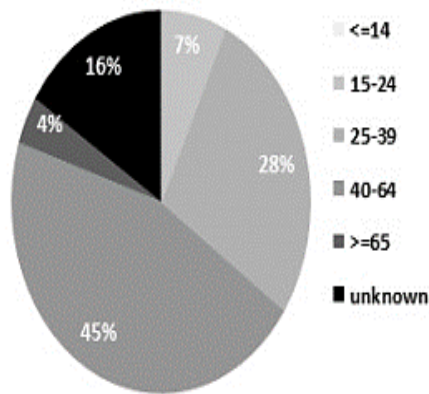
Επίσης μπορούν να προκύψουν προβλήματα όσον αφορά την ασφάλεια των εργαζομένων. Προβλήματα στη στάση του σώματος λόγω βαριάς και επαναλαμβανόμενης χειρωνακτικής εργασίας, πνιγμός, στρες, έκθεση σε χημικές

ουσίες, όπως οι φορμαλδεΰδη και παρασιτικές ή βακτηριακές λοιμώξεις, όπως η λεπτοσπείρωση και το άσθμα κ.α. (Ahmad et al., 2021). Μέσα σε αυτά, αν και ακόμη παρατηρείται αύξηση στον αριθμό των εργαζομένων σε υδατοκαλλιέργειες (Εικ.2.1.), προβλέπεται ότι θα υπάρξει έλλειμμα στο εργατικό δυναμικό των υδατοκαλλιεργειών, μιας και διαπιστώνεται αύξηση του μέσου όρου ηλικίας των ατόμων που ασχολούνται με το γεωργικό τομέα/ζωική παραγωγή σε διάφορα μέρη παγκοσμίως (Εικ.2.2) (Chiu et al., 2022).

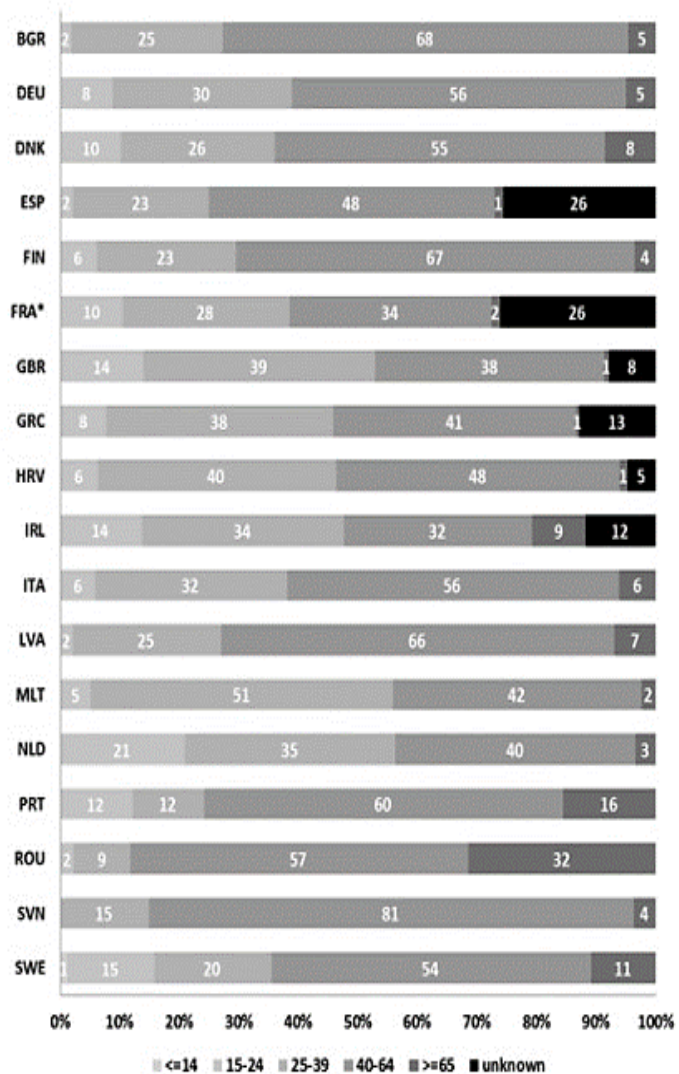
	1995	2000	2005	2010	2015	2020
	<i>(thousands)</i>					
Fisheries and aquaculture						
Africa	2 812	3 589	4 159	5 032	5 562	5 641
Americas	2 072	1 905	1 978	2 321	2 501	2 621
Asia	31 632	41 265	45 693	50 401	52 079	49 425
Europe	476	514	463	426	375	388
Oceania	466	475	478	482	481	474
Total	37 456	47 748	52 770	58 662	60 999	58 549
Fisheries						
Africa	2 743	3 395	3 906	4 671	5 057	5 007
Americas	1 793	1 605	1 679	1 981	2 156	2 015
Asia	24 205	28 335	30 476	31 994	31 833	30 102
Europe	378	418	380	333	286	294
Oceania	460	465	469	473	471	464
Total	29 579	34 219	36 909	39 452	39 803	37 882
Aquaculture						
Africa	69	194	252	361	505	634
Americas	279	301	299	340	345	606
Asia	7 426	12 930	15 217	18 407	20 246	19 323
Europe	98	96	83	93	89	94
Oceania	6	9	9	9	10	10
Total	7 878	13 529	15 861	19 211	21 195	20 667

Εικόνα 2.1. Αριθμός εργαζομένων παγκοσμίως σε αλιεία και υδατοκαλλιέργειες (Πηγή: FAO)

Distribution of age classes in EU aquaculture sector



Age distribution by MS



Εικόνα 2.2. Κατανομή ηλικιακών κλάσεων εργαζομένων στις υδατοκαλλιέργειες της Ευρωπαϊκής Ένωσης (Πηγή: Nicheva et al., 2022)

Ακόμη, μπορεί να προκύψουν επιπτώσεις, εάν η αύξηση της παραγωγής δεν συνδυαστεί με σωστή διαχείριση των μονάδων εκτροφής. Η υπερπαραγωγή χωρίς τους απαραίτητους ελέγχους και προφυλάξεις, έχουν οδηγήσει σε συχνές εξάρσεις ασθενειών στους εκτρεφόμενους ιχθύες και γενικά στη μείωση της ποιότητας του προϊόντος (Chiu et al., 2022).

Όλα αυτά τα δεδομένα οδηγούν στο συμπέρασμα ότι η υδατοκαλλιέργεια θα πρέπει να αναπτυχθεί περαιτέρω με ταχύτητα, αλλά βελτιώνοντας παράλληλα και τις εργασιακές συνθήκες του κλάδου, σε συνδυασμό πάντα με όλα τα βελτιωτικά εργαλεία. Η λύση έρχεται με τη μορφή της αυτοματοποίησης.

2.2. Νέα εργαλεία και βελτιωμένες πρακτικές

Ο κλάδος αναπτύσσεται με την εφαρμογή νέων τρόπων παρατήρησης, ταΐσματος, βελτίωσης της παραγωγής και της ευζωίας των εκτρεφόμενων ιχθύων. Η νοοτροπία αυτή της προσεκτικής φροντίδας έχει ως στόχο την ελαχιστοποίηση των απωλειών τόσο σε πόρους όσο και σε ιχθύες.

Ένας από τους κύριους στόχους όχι μόνο των υδατοκαλλιεργειών αλλά και γενικά των ζωικών εκτροφών είναι η αυτοματοποίηση των διαδικασιών εκτροφής (τάισμα, διαλογή κ.τ.λ.) και ο πλήρης έλεγχος όλων των συνθηκών εκτροφής. Σαν βάση του συγκεκριμένου σχεδίου μπορούν να λειτουργήσουν οι αυτοματοποιήσεις και οι ελεγχόμενες συνθήκες, που υπάρχουν στις βιομηχανίες και τα εργοστάσια παραγωγής και μεταποίησης προϊόντων.

Με τη βοήθεια των νέων τεχνολογιών που αναπτύσσονται συνεχώς, οι υδατοκαλλιέργειες αποκτούν τη δυνατότητα, να αυτοματοποιήσουν πολλές από τις εργασίες, που χρειάζεται να εκτελέσουν, ενώ ταυτόχρονα μπορούν να παρατηρούν και τις συνθήκες εκτροφής σε πραγματικό χρόνο. Σύμφωνα με τον Berckmans (2004) υπάρχουν τρεις παράμετροι, οι οποίες θα πρέπει να πληρούνται, έτσι ώστε ένα σύστημα εκτροφής να θεωρείται αυτοματοποιημένο και πλήρως ελεγχόμενο:

- Οι ζωικές μεταβλητές (π.χ. παράμετροι που συνδέονται με τη συμπεριφορά ή τη φυσιολογία του ζώου) θα πρέπει να μετρούνται συνεχώς με τη βοήθεια ανθεκτικών (όσον αφορά το κόστος) και ευαίσθητων αισθητήρων
- Θα πρέπει να υπάρχει ένα αξιόπιστο μοντέλο, το οποίο θα προβλέπει τη πιθανότητα μεταβολής των ζωικών μεταβλητών ως αντίδραση σε εξωτερικούς παράγοντες και να είναι διαθέσιμο κάθε στιγμή
- Οι προβλέψεις και οι μετρήσεις σε πραγματικό χρόνο θα πρέπει να ενσωματώνονται σε έναν αλγόριθμο, ο οποίος θα αναλύει τα δεδομένα και θα επιτρέπει την αυτόματη παρακολούθηση ή/και τον αυτόματο έλεγχο

Η απλή παρατήρηση δεν αρκεί, μιας και είναι αδύνατον το ανθρώπινο μάτι να προσέχει συνεχώς τις κινήσεις των ιχθύων, εάν εμφανίζουν συμπεριφορές, που συνδέονται με το στρες και τη καταπόνηση και το κυριότερο η παρατήρηση από την επιφάνεια είναι ελλιπέστατη. Για την αντιμετώπιση αυτών των εμποδίων δημιουργούνται συστήματα παρατήρησης αλλά και αυτόματης καταμέτρησης ιχθύων και απωλειών τροφής, καταγραφή αλλαγών συμπεριφοράς, συνεχής μέτρηση φυσικοχημικών συνθηκών κ.ά. Ιδιαίτερη σημασία όσον αφορά τις φυσικοχημικές μεταβλητές, έχουν το διαλυμένο οξυγόνο (DO/Dissolved Oxygen), η θερμοκρασία, η αμμωνία, το pH, η αγωγιμότητα και η ροή του νερού (Bernal-Higuera et al., 2023).

Σύμφωνα με τον FAO (2020), μερικές από τις πιο συχνά χρησιμοποιούμενες τεχνολογίες οι οποίες μπορούν να βελτιώσουν την υδατοκαλλιέργεια, είναι:

- Οι δορυφορικές εικόνες υψηλής ευκρίνειας (Belton et al., 2018)
- Τα αυτοματοποιημένα συστήματα ταυτοποίησης (James et al., 2018)
- Τα γενετικά προφίλ (Fagbemi et al., 2021),
- Οι κάμερες και οι αισθητήρες στο χώρο της εκτροφής (Føre et al., 2018)

- To blockchain (Hang et al., 2020)
- To Internet of Things (IoT) (Antonucci & Costa, 2020)
- Η τεχνητή νοημοσύνη (L. Yang et al., 2020)
- To Machine Learning (ML) (Taheri-Garavand et al., 2019)



Εικόνα 2.3. Εξοπλισμός Sonar, ο οποίος χρησιμοποιείται για τη συλλογή δεδομένων (Πηγή: Chang et al., 2022)

Όλες οι τεχνολογίες που αναφερθήκαν προηγουμένως, συμβάλλουν στη βελτίωση της παραγωγικής διαδικασίας και της προόδου προς τη πλήρη αυτοματοποίηση της υδατοκαλλιέργειας. Για την εφαρμογή και την πλήρη αξιοποίηση των υπολοίπων τεχνολογιών μεγάλο ρόλο παίζουν η τεχνητή νοημοσύνη και το IoT.

Δίνοντας μια γενικότερη εικόνα, υπάρχουν διάφοροι ορισμοί και τύποι τεχνητής νοημοσύνης (Artificial Intelligence/A.I.), γενικά όμως η τεχνολογία αυτή μπορεί να χαρακτηριστεί ως έξυπνα συστήματα, με τη δυνατότητα να σκέφτονται και να μαθαίνουν (Russell & Intelligence, 1995).

Το IoT αποτελεί ουσιαστικά μια προέκταση του διαδικτύου, στην οποία πολλά "αντικείμενα" όπως αισθητήρες, επεξεργαστές και ενεργοποιητές -σε συνδυασμό με ανθρώπινους χρήστες- είναι συνδεδεμένα και ικανά να παρέχουν δεδομένα υψηλής ποιότητας, από το περιβάλλον στο οποίο βρίσκονται και να έχουν ένα βαθμό ελέγχου στο περιβάλλον αυτό (Ryan & Watson, 2017).

Ένα παράδειγμα σχετικά με την αυτοματοποιημένη παρατήρηση είναι η ανάπτυξη υπολογιστικών αλγορίθμων, οι οποίοι σε συνδυασμό με παρεχόμενες εικόνες από κάποιες υποβρύχιες κάμερες μέσα στον κλωβό εκτροφής (Εικ.2.4.), θα μπορούν να αναλύσουν διάφορους παράγοντες (Føre et al., 2018). Υπάρχει η δυνατότητα μέσω υπολογιστικών προγραμμάτων να αναλυθούν παράμετροι όπως (Føre et al., 2018):

- Η κίνηση και ο συνωστισμός των ιχθύων (Eguiraun et al., 2014)
- Το μέγεθος των ιχθύων (Hao et al., 2016)
- Η αλλαγή συμπεριφοράς εξαιτίας κάποιου χημικού παράγοντα (Eguiraun & Martinez, 2015b; Eguiraun et al., 2016)
- Η κατάσταση του δέρματος των ιχθύων (Wallat et al., 2002)
- Η ποσότητα pellet τροφής μέσα στο νερό (Skøien, et al., 2014)

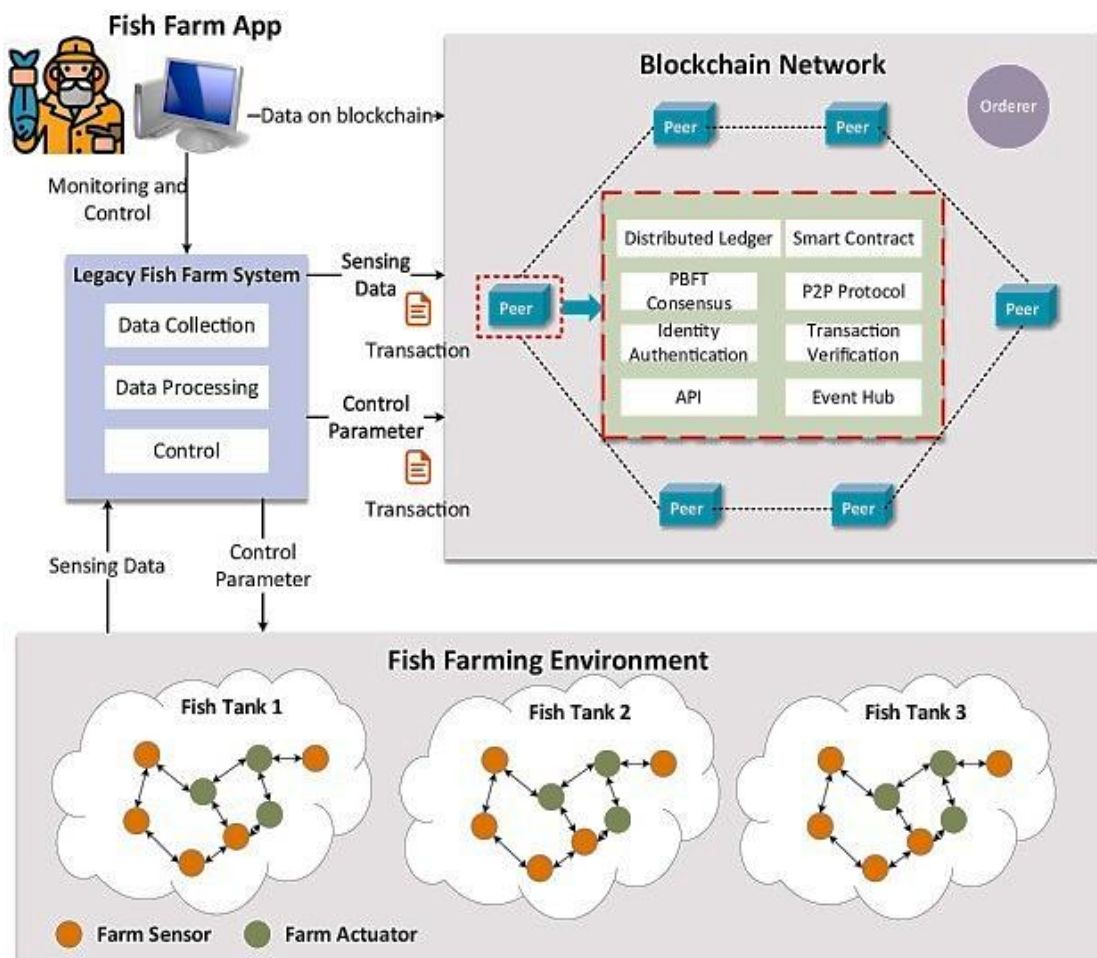


Εικόνα 2.4. Υποβρύχια κάμερα της εταιρίας Ace Aquatec, η οποία χρησιμοποιεί τεχνητή νοημοσύνη για τη καταγραφή βιομάζας στο νερό σε πραγματικό χρόνο (Πηγή: The Fish Site)

Η αυτοματοποίηση μπορεί να εφαρμοστεί και σε στάδια τα οποία δεν αφορούν άμεσα τη παραγωγή, αλλά μπορούν να συνεισφέρουν στη διασφάλιση της καλύτερης ποιότητας του τελικού προϊόντος. Μία από αυτές τις τεχνολογίες είναι και το blockchain. Το blockchain είναι ένας τύπος καθολικού, το οποίο εμπεριέχει όλες τις εκτελούμενες κινήσεις και έχει τις εξής ιδιαιτερότητες (Bano et al., 2019):

- Υπάρχει διαφάνεια στις συναλλαγές
- Τα δεδομένα που καταχωρούνται, δεν μπορούν να μεταβληθούν
- Δεν υπάρχει έλεγχος πάνω στα δεδομένα από μια κεντρική εξουσία
- Οι συναλλαγές δεν έχουν κάποιο μεσάζοντα
- Οι συναλλαγές πραγματοποιούνται, μόνο αν πληρούνται κάποιες προϋποθέσεις

Η τεχνολογία αυτή μπορεί να φανεί χρήσιμη, όσον αφορά την αποθήκευση και ανάλυση δεδομένων σχετικών με τη παραγωγή μιας υδατοκαλλιέργειας και τη διανομή των προϊόντων της, όπου τα δεδομένα συνήθως δεν είναι τόσο οργανωμένα όσο σε άλλες βιομηχανίες (Hang et al., 2020).



Εικόνα 2.5. Διάγραμμα αλληλεπιδράσεων προτεινόμενης πλατφόρμας για υδατοκαλλιέργειες, με βάση το blockchain. Τα δεδομένα της υδατοκαλλιέργειας συλλέγονται, αναλύονται και προσφέρουν προτεινόμενες πράξεις για τη διαχείριση της εκτροφής. Ταυτόχρονα το πακέτο δεδομένων διαμοιράζεται σε συνεργάτες και ασφαλίζεται μέσω blockchain (Πηγή: Hang et al., 2020)

2.3. Πλεονεκτήματα και δυσκολίες εφαρμογής

Οι αυτοματοποιήσεις αλλά και τα εργαλεία ελέγχου των φυσικοχημικών συνθηκών μπορούν να προσφέρουν πολλά πλεονεκτήματα και να οδηγήσουν στην καλύτερη και ασφαλέστερη λειτουργία των υδατοκαλλιεργειών. Αυτά τα πλεονεκτήματα μπορούν να έχουν επίδραση στο οικονομικό σκέλος μιας επιχείρησης, όπως για παράδειγμα στον περιορισμό του κόστους εκτροφής, στη βελτίωση της ευζωίας των εκτρεφόμενων οργανισμών, στην εξασφάλιση ασφαλών συνθηκών εργασίας για τους εργαζομένους στην εκάστοτε μονάδα κ.ά.

Για παράδειγμα, οι μετρήσεις υδρολογικών παραμέτρων όπως το διαλυμένο οξυγόνο, το pH, η θερμοκρασία του νερού, τα νιτρικά, η αμμωνία, η χλωροφύλλη κ.ά. (Devi et al., 2017), μπορούν με τη βοήθεια των νέων τεχνολογιών, να μετρηθούν και να αναλυθούν σε πραγματικό χρόνο, προσφέροντας άμεση γνώση της κατάστασης στα σημεία εκτροφής, ακόμη και αν αυτά βρίσκονται σε περιοχές όπως η ανοιχτή θάλασσα, όπου η συχνή παρουσία και μέτρηση μπορεί να είναι δύσκολη ή ακόμα και επικίνδυνη (Wei et al., 2020). Επίσης, η μέτρηση ανά τακτά χρονικά διαστήματα με τη βοήθεια αυτόματων αισθητήριων οργάνων (Εικ.2.6.) μπορεί να συνεισφέρει στη μείωση του κόστους παραγωγής μακροπρόθεσμα, κάνοντας τη τροφοληψία των ιχθύων αποδοτικότερη (Wei et al., 2020).



Εικόνα 2.6. Ασύρματος αισθητήρας μέτρησης φυσικοχημικών χαρακτηριστικών σε νερά εντατικής εκτροφής θαλάσσης, από την εταιρία Innovasea (Πηγή: www.innovasea.com)

Η χρήση ρομποτικών εργαλείων μπορεί και αυτή να συνεισφέρει θετικά στον κλάδο, ειδικά όσον αφορά τη χορήγηση τροφής, όπου παρατηρήθηκε ακριβής χορήγηση της, μειώνοντας έτσι τις οικονομικές απώλειες και βελτιώνοντας τις επιπτώσεις που μπορεί να υπάρξουν στο περιβάλλον γύρω από τις εκτροφές, εξαιτίας της τροφής που δεν καταναλώνεται (Antonucci & Costa, 2020).

Ακόμη, προσαρμοσμένα και βελτιωμένα προγράμματα όπως αυτό που προτείνουν οι Hang et al. (2020), τα οποία χρησιμοποιούν σε μεγάλο βαθμό blockchains, μπορούν να προσφέρουν πλεονεκτήματα όπως:

- Δυνατότητα αυξημένου φόρτου εάν υπάρξουν μελλοντικές προσθήσεις
- Αποθήκευση των δεδομένων με αποδοτικό τρόπο
- Ιδιωτικότητα και προστασία των δεδομένων μιας υδατοκαλλιέργειας
- Υψηλή αποδοτικότητα

Δεν λείπουν όμως και διάφοροι προβληματισμοί σχετικά με την εφαρμογή των νέων αυτών τεχνολογιών, οι οποίοι βασίζονται, στο κατά πόσο είναι εφαρμόσιμες οι τεχνολογίες αυτές σε ευρεία κλίμακα, εάν είναι συμφέρουσες οικονομικά κ.τ.λ..

Αρχικά, όπως είχε αναφερθεί προηγουμένως, οι περισσότεροι κλάδοι εκτροφής ζώων έχουν ως παράδειγμα για την εφαρμογή και τη δημιουργία των εκτροφών ακριβείας τις βιομηχανίες και τα εργοστάσια παραγωγής προϊόντων. Υπάρχουν όμως κάποιες σημαντικές διαφορές σε σχέση με τα εργοστάσια αυτά (Føre et al., 2018):

- Η παρακολούθηση και η καταγραφή είναι πιο περίπλοκη στα ζώα, μιας και παρουσιάζουν συμπεριφορές, οι οποίες μπορεί να είναι δύσκολες τόσο στη παρακολούθηση όσο και στην αξιολόγηση
- Τα ζώα κινούνται και πολλές φορές δεν είναι διατεθειμένα ή ικανά να υπακούσουν στους χειρισμούς του εκτροφέα, κάνοντας δυσκολότερη την εφαρμογή αυτόματων συστημάτων
- Πέρα από την εξασφάλιση των βασικών για την επιβίωση αναγκών, τα ζώα πρέπει να έχουν τη δυνατότητα έκφρασης συγκεκριμένων συμπεριφορών και να διατηρείται ένα συγκεκριμένο επίπεδο ευζωίας

Πολλά από τα προβλήματα που αντιμετωπίζει η υδατοκαλλιέργεια, είναι κοινά με αυτά των χερσαίων ζώων, οπότε οι ήδη εφαρμοζόμενοι αυτοματισμοί στη χέρσο μπορούν να λύσουν κάποια από τα εμπόδια της υδατοκαλλιέργειας, παρόλα αυτά υπάρχουν και αρκετά προβλήματα, τα οποία είναι μοναδικά στην εκτροφή των ιχθύων και περιπλέκουν περισσότερο την εφαρμογή των αυτοματισμών (Føre et al., 2018):

- Η τροφή που καταναλώνουν οι ιχθύες, προσφέρεται αποκλειστικά από τον εκτροφέα, δημιουργώντας μια έντονη σχέση εξάρτησης
- Τόσο η χορήγηση τροφής, όσο και οι άλλες παραγωγικές διαδικασίες της μονάδας πραγματοποιούνται σε όλο το κλωβό ταυτόχρονα, και όχι ατομικά ή σε μικρά γκρουπ
- Ο φυσιολογικός αριθμός των ιχθύων που βρίσκονται μέσα σε ένα κλωβό, υπερτερεί κατά πολύ σε σχέση με τον φυσιολογικό αριθμό των χερσαίων ζώων σε μια φάρμα
- Τα ψάρια ζούνε σε ένα πολύπλοκο περιβάλλον (υδάτινο), όπου οι περισσότερες διεργασίες πραγματοποιούνται κάτω από την επιφάνεια ή κοντά σε αυτή, κάτι το οποίο κάνει πιο περίπλοκες τις διεργασίες σε σχέση με τα παραγωγικά ζώα της χέρσου
- Η έκθεση των ιχθύων σε εξωτερικούς στρεσογόνους παράγοντες όπως τα παράσιτα (Grimnes & Jakobsen, 1996), οι παθογόνοι μικροοργανισμοί/ασθένειες (McVicar, 1987), οι χημικοί ρυπαντές (Brodin et al., 2013) και τα μικροπλαστικά (Wright et al., 2013), καθορίζεται κατά πολύ από το περιβάλλοντα χώρο και δεν μπορεί να διορθωθεί με ανθρώπινο έλεγχο και παρέμβαση

Σχετικά με το IoT, οι προκλήσεις προκύπτουν από προβλήματα όπως (Ploennigs et al., 2018):

- Η έλλειψη ιδιωτικότητας των δεδομένων
- Η έλλειψη επιχειρηματικών μοντέλων
- Η περιπλοκότητα των analytics
- Η έλλειψη ασφάλειας
- Το κόστος εφαρμογής

Όσον αφορά τη χρήση των blockchains, υπάρχει σκεπτικισμός, σχετικά με το κατά πόσο βελτιώνουν εν τέλει την υδατοκαλλιέργεια. Οι Garrard & Fielke (2020) για παράδειγμα ισχυρίζονται, ότι οι τεχνολογίες που βασίζονται στο blockchain, δεν προσφέρουν σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις συμβατικές μεθόδους αποθήκευσης και ανταλλαγής δεδομένων και η οποιαδήποτε σημαντική συνεισφορά θα προκύψει από τη ψηφιοποίηση του κλάδου.

3. ΤΕΧΝΗΤΗ ΝΟΗΜΟΣΥΝΗ

3.1. Βασικές έννοιες/τύποι τεχνητής νοημοσύνης

Σαν έννοια η τεχνητή νοημοσύνη άρχισε να ανακαλύπτεται πριν από περίπου 70 χρόνια. Στις αρχές του 1950, αφού οι Alan Turing και John Von Neumann είχαν δημιουργήσει τη γλώσσα binary (η οποία είναι η βάση όλων των υπολογιστικών συστημάτων του σήμερα και βασίζεται στην άλγεβρα Μπουλ), ο Turing έθεσε στο άρθρο του με τίτλο "Computing Machinery and Intelligence" το ερώτημα, του μέχρι που μπορεί να φτάσει η ευφυία των μηχανών, ανοίγοντας έτσι τη συζήτηση σχετικά με τις δυνατότητες ενός προγράμματος (COE, 2023).

Αφότου πέρασε από δύο περιόδους χαμηλού ενδιαφέροντος, στις αρχές της δεκαετίας του 1970 και στα τέλη του 1980 η τεχνητή νοημοσύνη γνώρισε νέα άνθιση στις αρχές του 2000, η οποία ήταν αποτέλεσμα των νέων συνθηκών που διαμορφώθηκαν, όπως η αύξηση της υπολογιστικής ισχύος, η συλλογή μεγάλου όγκου δεδομένων και η πρόοδος στην ανάλυση δεδομένων (Kaynak, 2021).

Πλέον, η τεχνητή νοημοσύνη εφαρμόζεται με διαφορετικούς τρόπους σε διάφορους κλάδους, ενώ αποτελεί κομμάτι της καθημερινότητας πολλών ανθρώπων, ακόμη και χωρίς να το γνωρίζουν οι ίδιοι. Οι εφαρμογές της τεχνητής νοημοσύνης είναι πολλές, με κάποιες από αυτές να είναι οι εξής (Jiang et al., 2022):

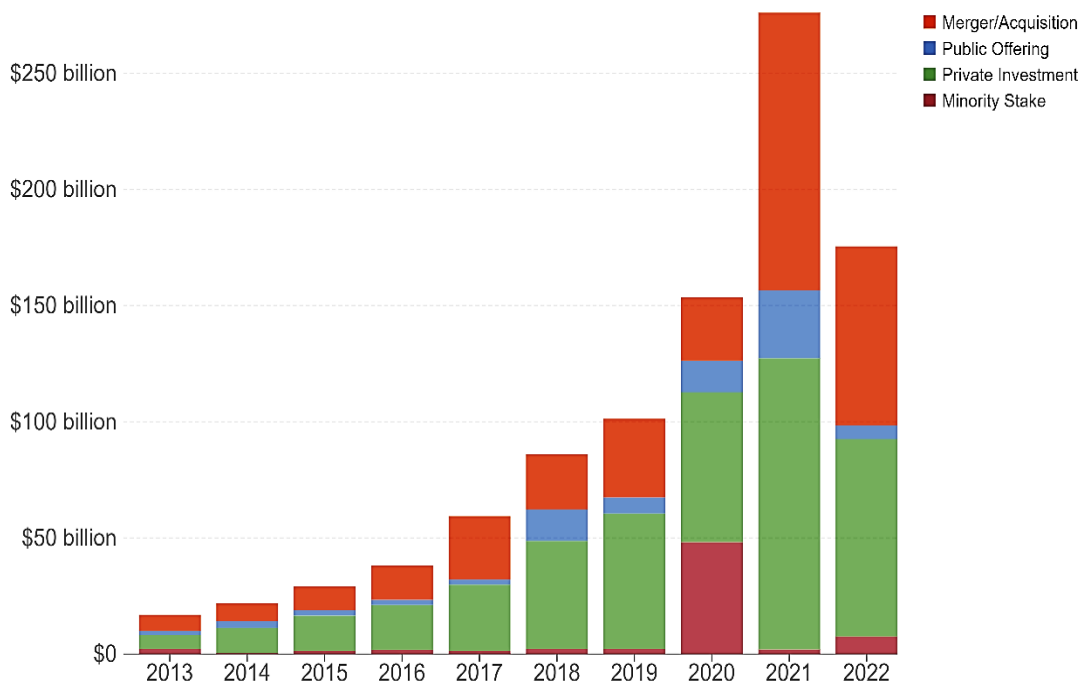
- Αναγνώριση ομιλίας (Hinton et al., 2012; Graves et al., 2013)
- Επεξεργασία εικόνας (He et al., 2016; Chollet, 2017)
- Έξυπνα ρομπότ (Palagi & Fischer, 2018; Gualtieri et al., 2021)

- Επεξεργασία φυσικής γλώσσας (Sutskever et al., 2014; Devlin et al., 2019)
- Αυτόνομα οχήματα (Menouar et al., 2017; Grigorescu et al., 2020)
- Υπηρεσίες υγείας (Yu et al., 2018; Elbadawi et al., 2021)
- Ενεργειακά συστήματα (Raza & Khosravi, 2015; Lu and Hong, 2019)

Λόγω του γεγονότος ότι η τεχνητή νοημοσύνη χρησιμοποιείται ευρέως σε πολλές πτυχές της καθημερινότητας, επενδύονται για την έρευνα και τη βελτίωσή της δισεκατομμύρια δολάρια κάθε χρόνο (Εικ.3.1.), έχοντας μπροστά της τεράστιες δυνατότητες. Η βιομηχανία που ασχολείται με τη τεχνητή νοημοσύνη, προβλέπεται ότι θα φτάσει σε αξία τα 190 δισεκατομμύρια δολάρια μέχρι το 2025, με σύνθετο ρυθμό ετήσιας ανάπτυξης πάνω από 36% μεταξύ των ετών 2018 και 2025 (Jiang et al., 2022).

Annual global corporate investment in artificial intelligence, by type

This data is expressed in US dollars, adjusted for inflation.



Source: NetBase Quid via AI Index Report (2023)

OurWorldInData.org/artificial-intelligence • CC BY

Note: Data is expressed in constant 2021 US\$. Inflation adjustment is based on the US Consumer Price Index (CPI).

Εικόνα 3.1. Παγκόσμια ετήσια επένδυση σχετικά με τη τεχνητή νοημοσύνη (Πηγή: Our World in Data)

Τα προγράμματα τεχνητής νοημοσύνης που χρησιμοποιούνται στη καθημερινότητα, επιτελούν απλές λειτουργίες, οι οποίες έχουν ήδη προκαθοριστεί από τον εκάστοτε προγραμματιστή, ανάλογα με τις ανάγκες που πρέπει να εξυπηρετήσει το πρόγραμμα. Τα συγκεκριμένα προγράμματα, επονομαζόμενα και ως ANI (Artificial Narrow Intelligence) ή weak AI είναι ικανά να επιτελέσουν απλές λειτουργίες, όπως για παράδειγμα να αυξήσουν την ασφάλεια ενός συστήματος, όπου αρκεί η επιβεβαίωση μιας προκαθορισμένης μεταβλητής, όμως δεν μπορούν να επιτελέσουν πιο σύνθετες λειτουργίες, όπου είναι αναγκαία η αναγνώριση ενός προβλήματος και η επίλυση του, όλα σε ένα ευρύτερο πλαίσιο και όχι απόλυτα προκαθορισμένο (Jiang et al., 2022).

Προχωρώντας περαιτέρω, ένας κλάδος της τεχνητής νοημοσύνης πέρα από αυτούς που προαναφέρθηκαν προηγουμένως, ο οποίος αναπτύχθηκε και συνεχίζει να αναπτύσσεται με γοργούς ρυθμούς, είναι το Machine Learning (ML).

Ως τεχνολογία, το ML περιλαμβάνει και βασίζεται στην ικανότητα να μαθαίνει μέσα από κάποιες διαδικασίες, με σκοπό να αποκτή εμπειρία μέσα από τη μάθηση αυτή και να είναι ικανό για τη τέλεση εργασιών, χρησιμοποιώντας το αρχικό δείγμα μάθηση ως στήριγμα (Zhao et al., 2021). Ουσιαστικά, εφαρμόζονται αλγόριθμοι, οι οποίοι δίνουν τη δυνατότητα στους υπολογιστές με τη βοήθεια ενός εκπαιδευτικού δείγματος, να βρίσκουν λεπτομέρειες και πολύπλοκα μοτίβα σε διάφορα προβλήματα, χωρίς να έχουν προγραμματιστεί εξ αρχής για την εύρεση συγκεκριμένων λεπτομερειών (Bishop, 2006).

Οι τρόποι με τους οποίους μπορεί να εκπαιδευτεί ένα λογισμικό ML, μπορούν να καταταχθούν σε τέσσερις κατηγορίες (Zhao et al., 2021):

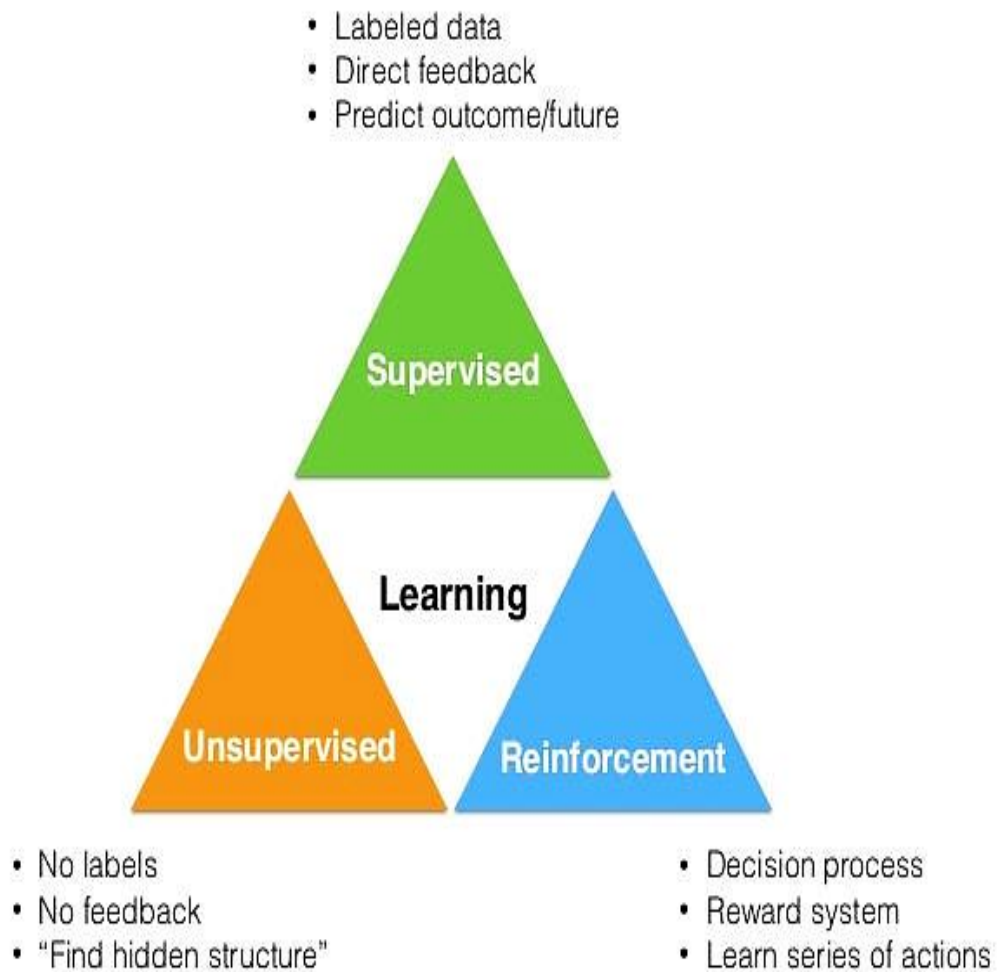
- Επιτηρούμενη μάθηση
- Μη επιτηρούμενη μάθηση
- Ήμι-επιτηρούμενη μάθηση
- Ενισχυτική μάθηση

Η πιο διαδεδομένη μορφή μάθησης για το ML είναι η επιτηρούμενη, όπου το δείγμα δεδομένων που χρησιμοποιείται για την εκπαίδευση του λογισμικού, είναι ήδη συνδεδεμένο με καθορισμένες πληροφορίες (Lu, 2010). Μέσα από τη συνεχόμενη εκπαίδευση με τη βοήθεια γνωστών δεδομένων και αποτελεσμάτων το λογισμικό μπορεί να αντλήσει ιδιοτιμές, να δημιουργήσει χάρτες συσχετισμών και να προβλέψει το αποτέλεσμα, που θα δώσουν τα οποιαδήποτε νέα δεδομένα (Kotsiantis, 2007).

Η μη επιτηρούμενη μάθηση δεν απαιτεί το δείγμα δεδομένων να έχει καθορισμένες πληροφορίες, ούτε υπάρχει λόγος να αναλυθούν οι επιδράσεις των δεδομένων αυτών σε συγκεκριμένα αποτελέσματα, ενώ η μόνη απαραίτητη ανάλυση είναι αυτή, που αφορά τους εσωτερικούς κανονισμούς των εκάστοτε δειγμάτων δεδομένων (Zhao et al., 2021).

Η ημι-επιτηρούμενη μάθηση είναι μια μέθοδος, η οποία συνδυάζει τόσο την επιτηρούμενη όσο και τη μη επιτηρούμενη μάθηση (Zhao et al., 2021).

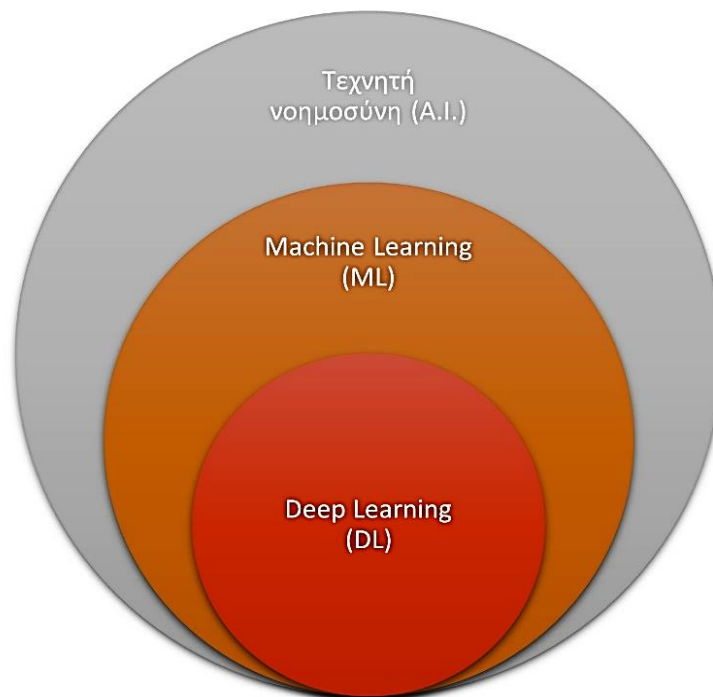
Τέλος, η ενισχυτική μάθηση είναι μια πιο πολύπλοκη μέθοδος ML, η οποία απαιτεί συνεχή αλληλεπίδραση μεταξύ του λογισμικού και του εξωτερικού κόσμου και χρησιμοποιείται για περιπτώσεις, όπου η λογική είναι αναγκαία, συνεχόμενη σε όλη τη διαδικασία που πραγματοποιεί το λογισμικό (Montague, 1999).



Εικόνα 3.2. Σχηματική απεικόνιση των τύπων μάθησης ενός λογισμικού ML (Πηγή: DataDrivenInvestor.com)

Μια υποκατηγορία της ML η οποία είναι σχετικά πιο πρόσφατη, είναι το Deep Learning (DL). Το DL μπορεί να αποδώσει πολύ καλύτερα σε μη δομημένα δεδομένα σε σχέση με το απλό ML και δίνει τη δυνατότητα σε υπολογιστικά προγράμματα, να εκπαιδευτούν κλιμακωτά, χρησιμοποιώντας δεδομένα σε διαφορετικά επίπεδα υπολογισμού (Mathew et al., 2021).

Το DL μπορεί να αποδώσει καλύτερα σε κλάδους με μεγάλο και πολυδιάστατο αριθμό δεδομένων, για αυτό μάλιστα παρατηρείται ανωτερότητα του DL σε σχέση με απλούς αλγόριθμους του ML, σε πεδία στα οποία απαιτείται η επεξεργασία κειμένου, ήχου, εικόνας, βίντεο και ομιλίας (LeCun et al., 2015). Παρόλα αυτά, σε περιπτώσεις όπου η παροχή δεδομένων είναι σχετικά χαμηλή και μονοδιάστατη, ειδικά σε περιπτώσεις όπου τα διαθέσιμα δεδομένα για εκπαίδευση του λογισμικού είναι λίγα, το απλό ML μπορεί να προσφέρει καλύτερα αποτελέσματα (Zhang & Ling, 2018), τα οποία μάλιστα μπορεί να είναι και πιο κατανοητά, σε σχέση με τα αποτελέσματα που θα προσφέρει ένα λογισμικό DL (Rudin, 2019).



Εικόνα 3.3. Σχέση μεταξύ της Τεχνητής νοημοσύνης, του Machine Learning (ML) και του Deep Learning (DL). Απεικονίζεται το γεγονός, ότι το ML ανήκει στη γενικότερη έννοια της Τεχνητής νοημοσύνης και το DL αντίστοιχα στη γενικότερη έννοια του ML (Πηγή: Δημιουργήθηκε από τον συγγραφέα)

3.2. Εφαρμογές στην υδατοκαλλιέργεια

Ο κλάδος της ιχθυοκαλλιέργειας δεν θα μπορούσε, να μην επωφεληθεί από τις τεχνολογικές εξελίξεις, που προέκυψαν στο τομέα της τεχνητής νοημοσύνης. Εξάλλου, η ίδια η φύση του κλάδου (υποβρύχιες εκτροφές, συχνές αντίξοες συνθήκες, διαφορετική επαφή με τον εκτρεφόμενο οργανισμό σε σχέση με τα χερσαία ζώα) έχει ανάγκη τέτοιες τεχνολογίες, εάν θέλει να αναπτυχθεί περαιτέρω.

Η τεχνητή νοημοσύνη όσον αφορά την ιχθυοκαλλιέργεια, εφαρμόζεται κυρίως σε πέντε μέτωπα: στη ποιότητα του νερού εκτροφής, στην ανακύκλωση του νερού (αφορά ιχθυοκαλλιέργειες κλειστού τύπου), στη σίτιση των ιχθύων, στη μεταφορά και τον εντοπισμό των ιχθύων μετά την εξαλίευση και στην ευζωία των ιχθύων (Bernal-Higuera et al., 2023).

Αναλόγως τη περίπτωση, ο απαραίτητος εξοπλισμός για την εφαρμογή των νέων τεχνολογιών μπορεί να μεταβληθεί. Κάτι το οποίο είναι φυσιολογικό μιας και η τεχνητή νοημοσύνη έχει τη δυνατότητα, να φτάσει σε λογικά συμπεράσματα και να προτείνει δράσεις (μερικές φορές υπάρχει η δυνατότητα αυτούσιας απόφασης), χρειάζονται όμως τα κατάλληλα εργαλεία, για να υπάρξουν σωστές μετρήσεις και παρατηρήσεις. Μέσα από αυτές τις παρατηρήσεις το πρόγραμμα της τεχνητής νοημοσύνης θα μπορεί να αντλήσει, τις πληροφορίες που χρειάζεται.

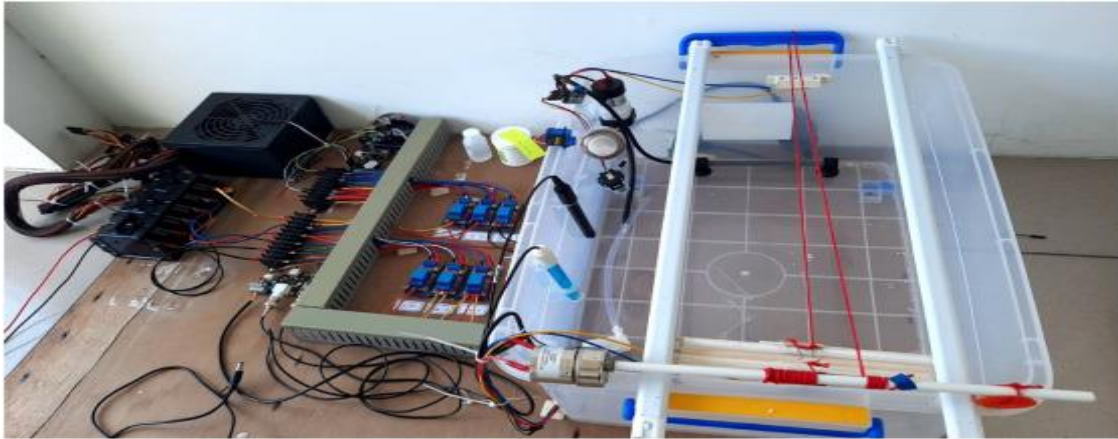
Οι Chang et al. (2021) ανέπτυξαν ένα σύστημα "έξυπνης" ιχθυοκαλλιέργειας (Εικ.3.4), το οποίο μπορεί με τη χρήση τεχνητής νοημοσύνης και εργαλείων παρατήρησης όπως κάμερες, αισθητήρες, ROV κ.α., να υπολογίσει το συσχετισμό της κίνησης των εκτρεφόμενων ιχθύων κατά τη χορήγηση τροφής, με τη ποσότητα που πρέπει να χορηγηθεί και σε συνδυασμό με περιβαλλοντικές παραμέτρους να χορηγήσει αυτόματα, όση ποσότητα χρειάζεται. Το πρόγραμμα τεχνητής νοημοσύνης που

αναπτύχθηκε, ήταν επίσης ικανό, να μετρήσει το μήκος και το βάρος κάθε ιχθύος, με ακρίβεια που φτάνει το 90%.



Εικόνα 3.4. Σχεδιάγραμμα του συστήματος που προτείνουν οι Chang et al. (Πηγή: Chang et al., 2021)

Οι Chiu et al. (2022) ανέπτυξαν ένα παρόμοιο σύστημα έξυπνης ιχθυοκαλλιέργειας (Εικ.3.5.), το οποίο παρέχει τη δυνατότητα καταγραφής δεδομένων φυσικοχημικών παραμέτρων σε πραγματικό χρόνο και την ανάρτηση των δεδομένων αυτών στο cloud, για πιο γρήγορη επεξεργασία των δεδομένων από το πρόγραμμα τεχνητής νοημοσύνης DL που ανέπτυξαν. Επίσης, το εν λόγω πρόγραμμα τεχνητής νοημοσύνης έχει την ικανότητα, να υπολογίσει με βάση τα δεδομένα την μέση ανάπτυξη των εκτρεφόμενων ιχθύων και να προσαρμόσει τη ποσότητα χορηγούμενης τροφής.

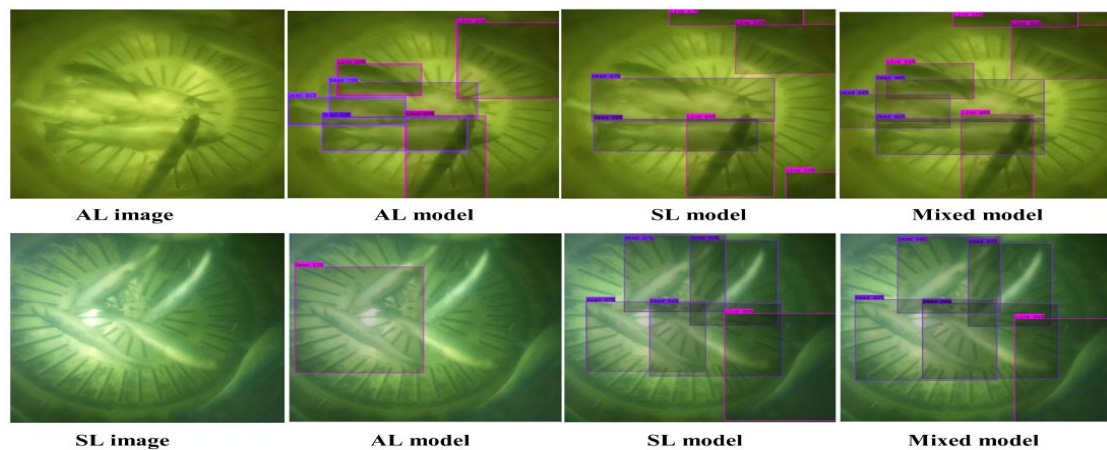


Εικόνα 3.5. Πρωτότυπο του συστήματος έξυπνου ταΐσματος που ανέπτυξαν οι Chiu et al. Στο πρωτότυπο διακρίνονται οι αισθητήρες οι οποίοι είναι υπεύθυνοι για τη καταγραφή των συνθηκών, καθώς και το σύστημα καταγραφής και μετάδοσης στο οποίο συνδέονται (Πηγή: Chiu et al., 2022)

Οι Li et al. (2022) μελέτησαν τέσσερις διαφορετικές τεχνικές ML (Back Propagation Neural Network/BPNN, Radial Basis Function Neural Network/RBFNN, Support Vector Machine/SVM, Least Squares Support Vector Machine/LSSVM), με σκοπό να συγκρίνουν την ικανότητα του κάθε προγράμματος, να προβλέπει με ακρίβεια τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του νερού (pH, αμμωνία και τα παράγωγά της, διαλυμένο οξυγόνο). Μέσα από τις συγκρίσεις τους προέκυψε, ότι το πρόγραμμα SVM είχε ποσοστό ακρίβειας στις προβλέψεις στο 99%.

Οι Ranjan et al. (2023) συνδύασαν υποβρύχιες κάμερες με τροποποιημένο πρόγραμμα τεχνητής νοημοσύνης YOLOv7, έχοντας ως σκοπό τη δημιουργία συστήματος καταμέτρησης νεκρών ψαριών σε κλειστά συστήματα RAS. Χρησιμοποιώντας συλλογή φωτογραφιών (Εικ.3.6.), που συλλέξαν μέσα από το κλειστό σύστημα για ενενήντα ημέρες, σε διαφορετικές συνθήκες φωτισμού,

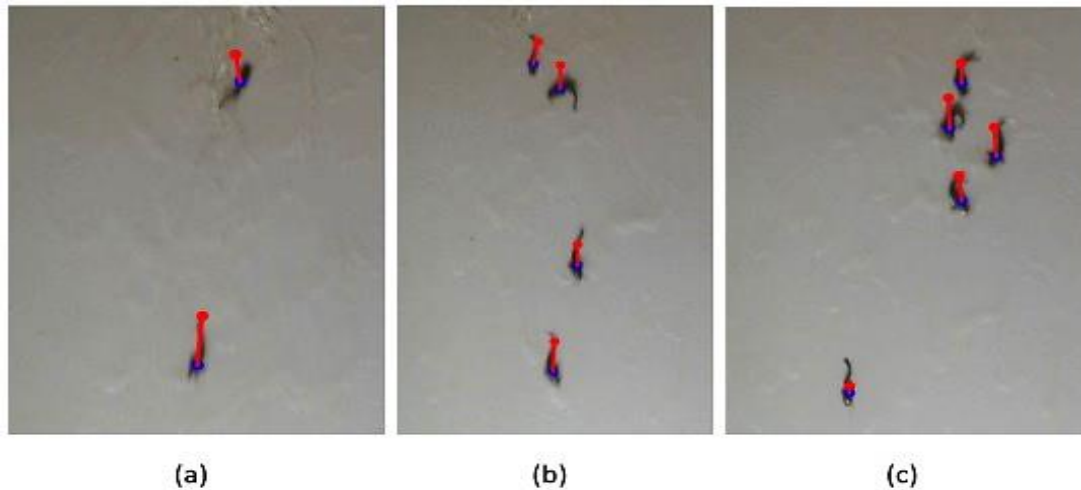
εκπαιδεύσαν, επαληθεύσαν και δοκίμασαν την αποτελεσματικότητα, που είχε το σύστημα στον ορθό εντοπισμό των νεκρών ιχθύων. Η μέση ακρίβεια του συστήματος για όλες τις συνθήκες φωτισμού συνδυαστικά έφτασε το 93.4%, και το σκορ F1 το 0.89 (το σκορ F1 είναι μονάδα μέτρησης της ακρίβειας και της ικανότητας ανασκόπησης ενός συστήματος ML. Όσο πιο κοντά στη μονάδα βρίσκεται το F1, το πιο αποδοτικό το σύστημα). Το συγκεκριμένο σύστημα παρέχει επίσης τη δυνατότητα αποστολής email και μηνυμάτων για απευθείας ειδοποίηση, εάν η θνησιμότητα παρέκκλιε του φυσιολογικού.



Εικόνα 3.6. Η επίδοση των μοντέλων AL, SL και συνδυαστικού όσον αφορά τη καταμέτρηση νεκρών ιχθύων κατά τη δοκιμή των μοντέλων σε συνθήκες φωτισμού AL και SL. Τα κουτιά με ροζ χρώμα αντιπροσωπεύουν τα ζωντανά άτομα, ενώ αυτά με μωβ τα νεκρά. Το συνδυαστικό μοντέλο είχε ίδια επίδοση και στις δύο περιπτώσεις (Πηγή: Ranjan et al., 2023)

Οι Gonçaves et al. (2022) ανέπτυξαν, εκμεταλλευόμενοι τεχνητή νοημοσύνη που λειτουργεί με Convolutional Neural Networks (CNN), ένα πρόγραμμα το οποίο είναι

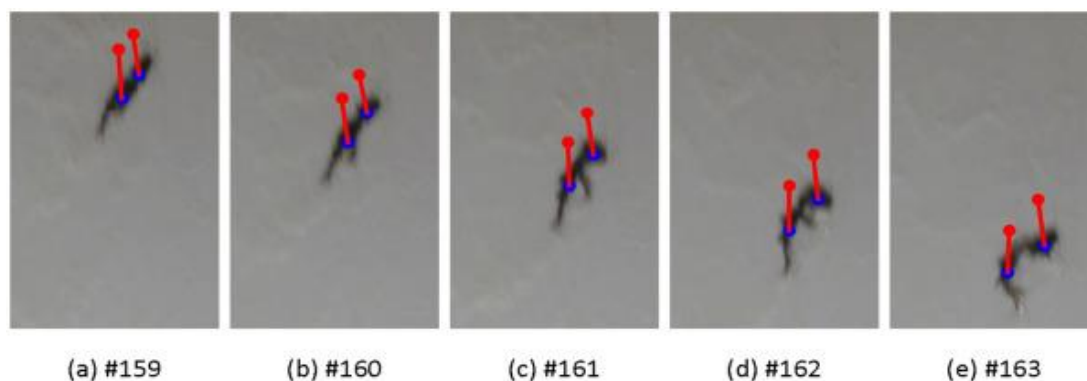
ικανό, να καταμετρήσει τα ιχθύδια μιας δεξαμενής με τη χρήση εικόνων (Εικ.3.7. & 3.8.). Εκπαιδύοντας το πρόγραμμα, να προβλέπει τη πιθανότητα εμφάνισης ενός ιχθυδίου σε κάποιο pixel αλλά και τις πιθανές κινήσεις των ιχθυδίων μέσα στη δεξαμενή, καταφέραν να έχουν αποτελέσματα F1 ίσα και μεγαλύτερα του 95.42 ανάλογα με τον αριθμό των ιχθυδίων σε κάθε φωτογραφία (από ένα έως δέκα).



Εικόνα 3.7. Παραδείγματα εντοπισμού για (a) δύο, (b) τέσσερα, (c) πέντε ιχθύδια (Πηγή: Gonçaves et al., 2022)

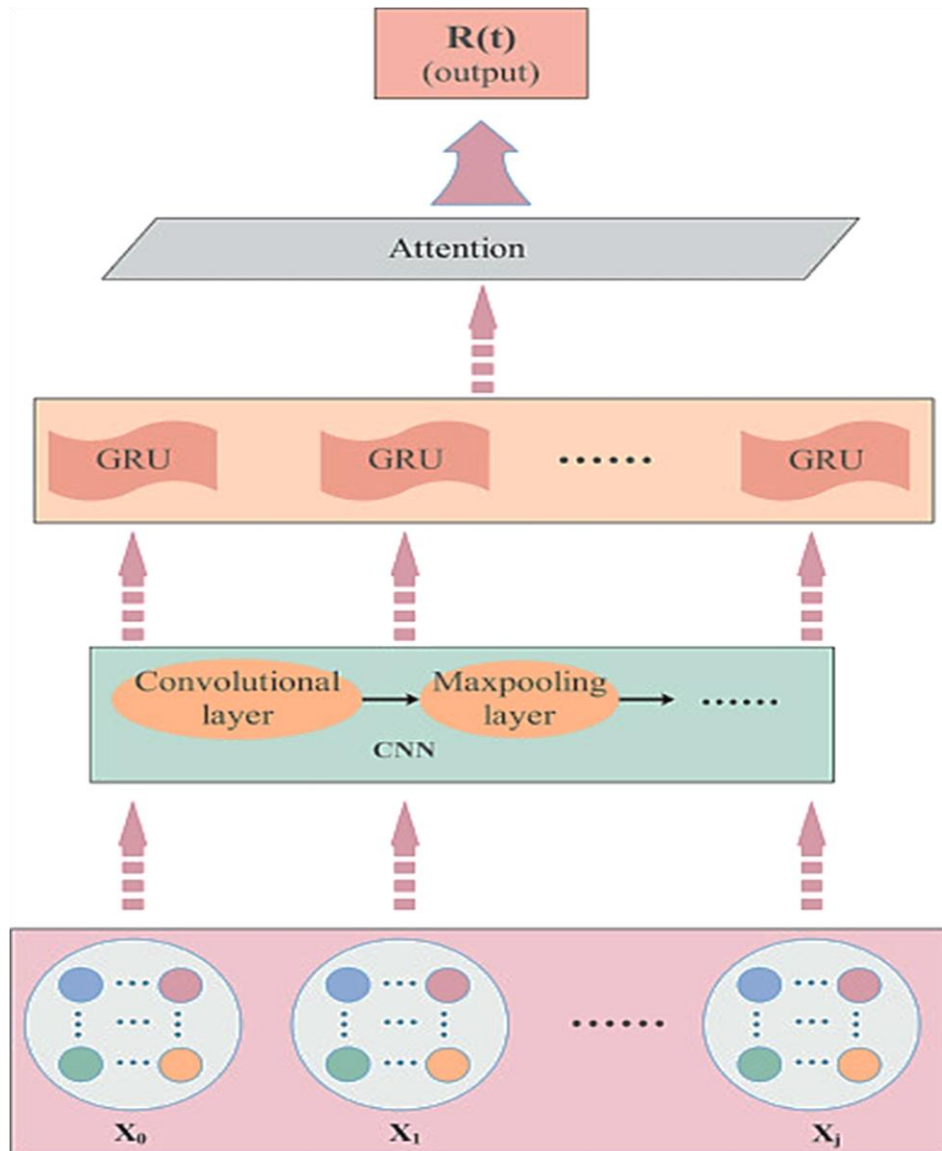
Επίσης, στις περισσότερες περιπτώσεις το πρόγραμμα ήταν ικανό, να εντοπίσει εάν υπήρχε επικάλυψη μεταξύ δύο ή και περισσότερων ιχθυδίων, κάτι το οποίο αποτελούσε μεγάλη πρόκληση για την επιτυχή εφαρμογή του (Εικ.3.8).

ρ



Εικόνα 3.8. Παραδείγματα εντοπισμού και καταμέτρησης ιχθυδίων που επικαλύπτονται (Πηγή: Gonçaves et al., 2022)

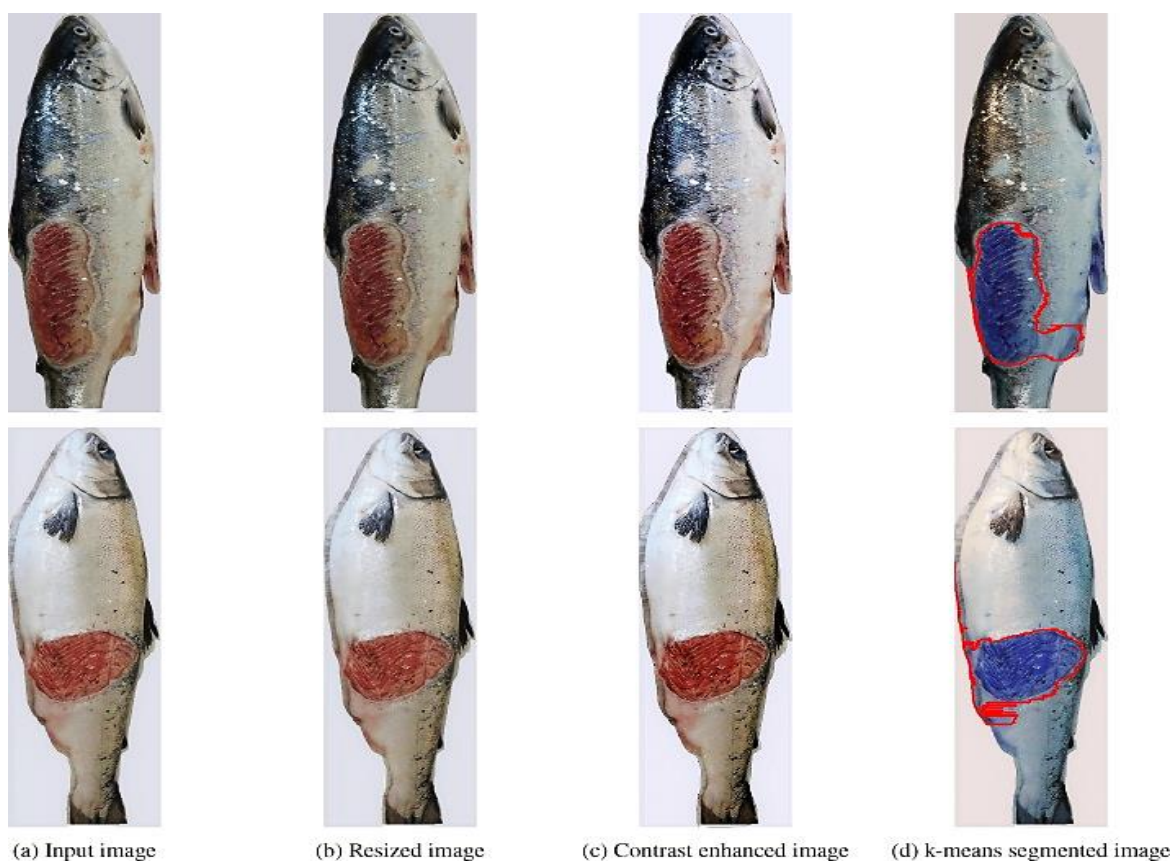
Οι Yang et al. (2023) συνδύασαν τα λογισμικά CNN, GRU (Gated Recurrent Unit) και Attention, με στόχο τη πρόβλεψη της ποιότητας του νερού μιας μονάδας RAS (Recirculating Aquaculture System), έτσι ώστε να υπάρχει η δυνατότητα προσαρμογής του παρεχόμενου όγκου νερού, του ρυθμού παροχής και του ύψους νερού. Μετά από πειραματισμούς οι Yang et al. (2023) κατέληξαν στο συμπέρασμα, ότι το προτεινόμενο σύστημα PC-CGA (Prediction, Control – CNN, GRU, Attention) (Εικ.3.9.) παρουσιάζει καλύτερη απόδοση σε σχέση με το μοντέλο σύγκρισης, όσον αφορά τη πρόβλεψη τόσο του COD (Chemical Oxygen Demand) όσο και του NH₃-N (αμμωνιακό άζωτο), ενώ και το R² (συντελεστής προσδιορισμού, ο οποίος δείχνει την αναλογία της διακύμανσης στην εξαρτημένη μεταβλητή που είναι προβλέψιμη από την ανεξάρτητη μεταβλητή) μπορεί να φτάσει πάνω από 0.9.



Εικόνα 3.9. Η δομή του προτεινόμενου λογισμικού. Τα αντλούμενα δεδομένα (X_i) από τη μονάδα RAS, παρέχονται στον αλγόριθμο CNN ο οποίος έχει τη δυνατότητα ανάλυσης πολλαπλών παραμέτρων ταυτόχρονα. Έπειτα, τα δεδομένα αναλύονται από ένα σύστημα GRU, το οποίο δίνει βάση στη χρονική στιγμή που αντλήθηκαν τα δεδομένα, και τέλος τα δεδομένα περνάνε από το πρόγραμμα Attention, με σκοπό να οξυνθεί η ακρίβεια των προβλέψεων ($R(t)$) (Πηγή: Yang et al., 2023)

Οι Ahmed et al. (2022) ανέπτυξαν ένα σύστημα, το οποίο αξιολογεί εάν ένας σολομός είναι υγιής ή όχι με βάση την εξωτερική του μορφολογία. Χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο SVM (Support Vector Machine), ο οποίος ανήκει στη κατηγορία των

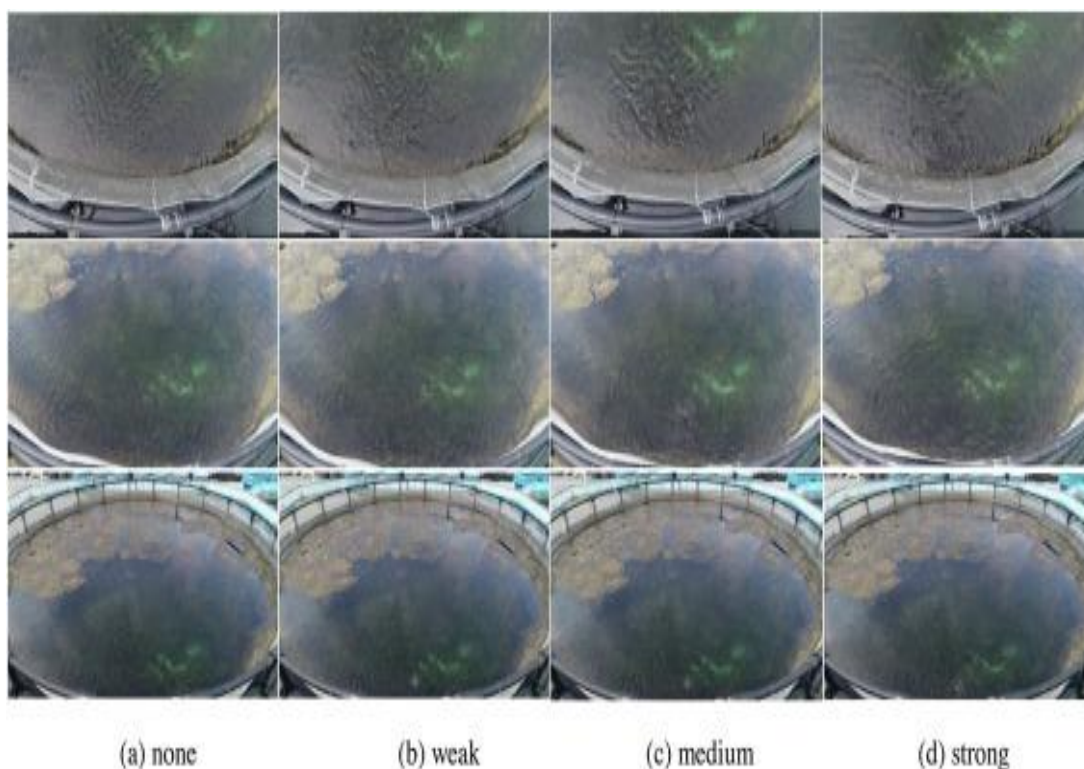
αλγορίθμων, που λειτουργούν με επιτηρούμενη μάθηση και εκπαιδεύοντάς τον τόσο με πραγματικές εικόνες, όσο και με παραπονημένες, ώστε να δημιουργηθεί μεγαλύτερη βάση δεδομένων, καταφέραν να επιτύχουν ακρίβεια 91.42% στη βάση δεδομένων με τις παραπονημένες εικόνες και 94.12% στη βάση δεδομένων μόνο με τις πραγματικές εικόνες. Για την επιτυχία του προγράμματος εφαρμόστηκε επεξεργασία των εικόνων και κατηγοριοποίησή τους προτού εισαχθούν στο SVM.



Εικόνα 4.10. Δύο εικόνες κατά τα στάδια της επεξεργασίας που δέχονται, προτού εξαχθούν τα ενδιαφέροντα χαρακτηριστικά. Στη πρώτη στήλη (a) είναι οι εισαχθείσες εικόνες, στη δεύτερη (b) οι εικόνες μετά από προσαρμογή του μεγέθους, στη τρίτη (c) οι εικόνες μετά από την αύξηση της αντίθεσης και στη τέταρτη (d) οι εικόνες μετά την απομόνωση του προβλήματος.

Πηγή: Ahmed et al. (2022)

Οι Ubina et al. (2021) προτείνουν μια διαφορετική μέθοδο παρακολούθησης και αξιολόγησης της τροφοληψίας των εκτρεφόμενων ιχθύων. Χρησιμοποιώντας δύο διαφορετικά CNNs, ένα optical flow neural network και ένα 3D CNN, καταφέραν να επιτύχουν ακρίβεια της εκτιμώμενης τροφοληψίας έως και 95%. Για την απόκτηση των απαραίτητων οπτικών δεδομένων χρησιμοποίησαν εικόνες RGB (Red, Green, Blue) από ιπτάμενο drone, με τα δεδομένα μετέπειτα να κατηγοριοποιούνται σε τέσσερις ομάδες (μηδενική τροφοληψία, αδύναμη τροφοληψία, μέτρια τροφοληψία και ισχυρή τροφοληψία), ανάλογα με την ένταση της τροφοληψίας που παρατηρήθηκε σε κάθε εικόνα (Εικ.3.11.).



Εικόνα 3.11. Εικόνες/δεδομένα έντασης της τροφοληψίας των ιχθύων σε τέσσερις διαφορετικές περιπτώσεις (a: μηδενική, b: ελάχιστη, c: μέτρια, d: έντονη) (Πηγή: Ubina et al., 2021)

3.3. Πλεονεκτήματα και δυσκολίες εφαρμογής

Τα πλεονεκτήματα της εφαρμογής προγραμμάτων τεχνητής νοημοσύνης είναι πολλά και σε διαφορετικούς τομείς της ιχθυοκαλλιέργειας. Για παράδειγμα, έχοντας ένα εξειδικευμένο πρόγραμμα τεχνητής νοημοσύνης, να καταμετρά την ύπαρξη νεκρών ατόμων σε πραγματικό χρόνο και να αξιολογεί εάν υπερβαίνουν του φυσιολογικού, μπορεί να υπάρξει έγκαιρη παρέμβαση μετά από ειδοποίηση του προγράμματος, φροντίζοντας έτσι για την ευζωία των εκτρεφόμενων ατόμων και αποτρέποντας μελλοντικές θνησιμότητες (Ranjana et al., 2023).

Επίσης, η χρήση τεχνητής νοημοσύνης μπορεί να συνεισφέρει και στην εξοικονόμηση τροφής, παρακολουθώντας την αναταραχή, που υπάρχει στο νερό κατά τη τροφοληψία και σταματώντας το τάισμα, μόλις η αναταραχή αυτή κοπάσει, με αποτέλεσμα την ελαχιστοποίηση της τροφής που δεν καταναλώνεται (Chang et al., 2021). Η μείωση της απώλειας τροφής μπορεί να βοηθήσει τόσο στην εξοικονόμηση χρημάτων όσο και στη προστασία του περιβάλλοντος.

Ακόμη, η τεχνητή νοημοσύνη μπορεί να βοηθήσει στη πρόληψη ασθενειών, προτού αυτές οδηγήσουν σε θανάτους. Η κατανομή κανονικών ατόμων ενός είδους και ατόμων με δυσμορφίες μπορεί να πραγματοποιηθεί με τη χρήση τεχνητής νοημοσύνης, παρατηρώντας έτσι εάν υπάρχει μεγάλος αριθμός ατόμων με δυσμορφίες και επιλύοντας το πρόβλημα, πριν επεκταθεί περισσότερο (Chen et al., 2022).

Η τεχνητή νοημοσύνη πέρα από την αξιολόγηση μιας κατάστασης μπορεί να συνεισφέρει θετικά και στη πρόβλεψη συνθηκών, ανάπτυξης κ.ά. Εάν υπάρχει για παράδειγμα ανάλυση της συσχέτισης των συνθηκών εκτροφής με την ανάπτυξη των εκτρεφόμενων ιχθύων, ο εκτροφέας μπορεί να φροντίσει, έτσι ώστε οι συνθήκες να είναι βέλτιστες, ενώ θα μπορεί και να τις κατηγοριοποιήσει ανάλογα με τη

σημαντικότητά τους (Chiu et al., 2022). Επίσης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για τη πρόβλεψη μεταβολής των φυσικοχημικών χαρακτηριστικών με βάση ερευνητικά δεδομένα αλλά και μετρήσεις πεδίου, δίνοντας τη δυνατότητα προσαρμογής και προετοιμασίας, προτού υπάρξει αλλαγή των συνθηκών (Li et al., 2022).

Πέρα από μετρήσεις και αξιολογήσεις, η τεχνητή νοημοσύνη μπορεί να προσφέρει μια γενική ανάπτυξη των αυτοματοποιήσεων σε μια ιχθυοκαλλιέργεια, δημιουργώντας έτσι ιδανικότερες και ασφαλέστερες συνθήκες εργασίας για εργαζόμενους σε ιχθυοκαλλιέργειες ανοιχτής θάλασσας, οι οποίες συχνά αντιμετωπίζουν αρκετά δυσμενείς καιρικές συνθήκες.

Όπως προαναφέρθηκε, η χρήση της τεχνητής νοημοσύνης στον κλάδο της ιχθυοκαλλιέργειας είναι ακόμα στο πρωταρχικό στάδιο, με αποτέλεσμα να μην έχουν αντιμετωπιστεί ακόμα διάφορα προβλήματα, τα οποία έχουν προκύψει.

Ένα κύριο πρόβλημα, το οποίο υπάρχει στις περισσότερες καινοτόμες τεχνολογίες, είναι το κόστος. Το κόστος εφαρμογής και λειτουργίας όχι μόνο των προγραμμάτων τεχνητής νοημοσύνης αλλά και του επιπρόσθετου απαραίτητου εξοπλισμού είναι προς το παρόν απαγορευτικό για τις περισσότερες ιχθυοκαλλιέργειες μικρής και μεσαίας κλίμακας (Vo et al., 2021; Wu et al., 2022).

Επίσης, για την εφαρμογή των έξυπνων συστημάτων, τόσο αυτών που αναφέρθηκαν προηγουμένως αλλά και των υπολοίπων, προκύπτει ένα συγκεκριμένο εμπόδιο. Δεν αρκεί μόνο να χτιστεί το μοντέλο, να εισαχθεί σε κάποιο σύστημα και να εφαρμοστεί, αλλά πρέπει να ληφθούν υπόψιν και το περιβάλλον όπου θα λειτουργήσει, το οποίο περιλαμβάνει ανθρώπους, εταιρίες και γενικά αρκετές μεταβλητές, οι οποίες ξεφεύγουν από το κομμάτι της τεχνογνωσίας (Janiesch et al., 2021).

Ακόμη ένα πρόβλημα αποτελεί η έλλειψη επαρκών δεδομένων. Η τεχνητή νοημοσύνη τύπου ML/DL χρειάζεται δεδομένα (κατά τον προγραμματισμό ή και κατά την εκπαίδευση της), για να μπορέσει να λειτουργήσει σωστά. Η έλλειψη των δεδομένων αυτών αποτελεί σημαντικό πρόβλημα, μπορεί να οδηγήσει σε ανακρίβειες κατά τη λειτουργία του προγράμματος, ενώ τίθεται ακόμα και θέμα ασφαλείας, σχετικά με τα δεδομένα που θα αποφασίσουν να μοιραστούν οι ιχθυοκαλλιέργειες για την ανάπτυξη της βάσης δεδομένων (Vo et al., 2021; Zhao et al., 2021; Gladju et al., 2022).

Επίσης, σημασία έχει και η ποιότητα των δεδομένων που λαμβάνει ένα πρόγραμμα τεχνητής νοημοσύνης, το οποίο καλείται να αξιολογήσει, τις εισροές που δέχεται, προτού προτείνει ή αποφασίσει. Για παράδειγμα, προγράμματα επεξεργασίας εικόνας και βίντεο τα οποία μετατρέπουν την οπτική πληροφορία που λαμβάνουν μέσω καμερών σε δεδομένα, μπορεί να αντιμετωπίσουν πρόβλημα, εάν η πληροφορία αυτή δεν έχει τη κατάλληλη ευκρίνεια εξαιτίας θολερότητας του νερού, βλάβης στον εξοπλισμό, αλλαγών στις συνθήκες φωτισμού κ.ο.κ. (Zhao et al., 2021)

4. ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Οι υδατοκαλλιέργειες εκτρέφοντας ήδη περίπου το 50% της παγκόσμιας παραγωγής ιχθύων, θα κληθούν μελλοντικά, να καλύψουν ακόμα μεγαλύτερα ποσοστά, μιας και η αλιεία -η οποία είναι ο έτερος μεγάλος προμηθευτής ιχθύων- παρουσιάζει στασιμότητα και το πιθανότερο είναι να υπάρξει ύφεση των αλιευμάτων παρά την αύξηση της αλιευτικής προσπάθειας. Για τον λόγο αυτό, οι υδατοκαλλιέργειες θα πρέπει να βελτιώσουν ακόμη περισσότερο τις πρακτικές εκτροφής των ιχθύων, έχοντας ως στόχο την αύξηση της παραγωγής, με τη ταυτόχρονη διατήρηση της τιμής σε χαμηλά επίπεδα, φροντίζοντας παράλληλα τόσο για την ποιότητα του τελικού προϊόντος, όσο και για την ευζωία των εκτρεφόμενων ιχθύων.

Για την επίτευξη των στόχων αυτών η υδατοκαλλιέργεια μπορεί και πρέπει να ενσωματώσει στις παραγωγικές διαδικασίες σύγχρονα εργαλεία και τεχνολογίες.

Εργαλεία όπως η τεχνητή νοημοσύνη, το IoT, το blockchain, αλλά και ρομπότ εργασίας, αισθητήρες μέτρησης των φυσικοχημικών χαρακτηριστικών, αυτοματοποιημένα εργαλεία τάϊσματος κ.ά. μπορούν να συνεισφέρουν στη βελτίωση της παραγωγής, αλλά και στην σταδιακή αυτοματοποίηση όλης της παραγωγικής διαδικασίας, καθώς και στον έλεγχο των συνθηκών εκτροφής.

Η τεχνητή νοημοσύνη μπορεί να αποτελέσει μια από τις σημαντικότερες εξελίξεις στον κλάδο της υδατοκαλλιέργειας και όχι μόνο. Η σωστή εφαρμογή της μπορεί να αλλάξει ριζικά, τον τρόπο με τον οποίο γίνονται καθημερινές και αναγκαίες εργασίες σε μια εκτροφή. Από το τάϊσμα και τον έλεγχο των περιβαλλοντικών συνθηκών στην εκτροφή σε πραγματικό χρόνο, μέχρι την έγκαιρη εύρεση ασθενειών στους εκτρεφόμενους ιχθύες και την ειδοποίηση εάν κάτι είναι διαφορετικό από το φυσιολογικό. Οι δυνατότητες της τεχνητής νοημοσύνης είναι μεγάλες.

Για να εφαρμοστεί όμως σωστά, θα πρέπει να υπάρχουν και οι κατάλληλες συνθήκες/εξοπλισμός. Για τη σωστή και απρόσκοπτη λειτουργία της τεχνητής νοημοσύνης είναι απαραίτητα εργαλεία, τα οποία θα παρατηρούν και θα αποστέλλουν τα δεδομένα, εργαλεία που θα εκτελούν τις εντολές, που πιθανώς να δοθούν είτε από το λογισμικό τεχνητής νοημοσύνης ή από το χρήστη. Επίσης, πολύ σημαντική είναι η συγκέντρωση και η αξιολόγηση δεδομένων, τα οποία δεδομένα διαφοροποιούνται, ανάλογα με το ποιες λειτουργίες θα πρέπει να εκτελεί το λογισμικό τεχνητής νοημοσύνης. Τα αρχικά δεδομένα τα οποία θα χρησιμοποιηθούν για την εκπαίδευση του προγράμματος αλλά και για τη δοκιμή του, πρέπει να είναι αρκετά σε αριθμό, αληθή και διαφοροποιημένα. Αλλιώς υπάρχει κίνδυνος το τελικό λογισμικό, να μην έχει ικανοποιητικό ποσοστό επιτυχίας, στην εκάστοτε λειτουργία που θα επιτελέσει.

Συμπερασματικά, η τεχνητή νοημοσύνη έχει τη δυνατότητα να βελτιώσει κατά πολύ όλες τις παραγωγικές διαδικασίες της υδατοκαλλιέργειας, θα πρέπει όμως να συνδυάζεται με τα κατάλληλα εργαλεία, αλλά και να υπάρξει μια ευρεία και παγκόσμια ανταλλαγή δεδομένων ανάμεσα στους υδατοκαλλιεργητές, έτσι ώστε τα δεδομένα που θα προκύψουν να αποτελέσουν μια σταθερή βάση για τη κατάλληλη εκπαίδευση όλων των λογισμικών τεχνητής νοημοσύνης, που πιθανόν να προκύψουν μελλοντικά και να εφαρμοστούν σε ευρεία κλίμακα.

5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Ahmad, A., Sheikh Abdullah, S.R., Hasan, H.A., Othman, A.R., Ismail, N. 'Izzati, 2021. Aquaculture industry: Supply and demand, best practices, effluent and its current issues and treatment technology. *Journal of Environmental Management* 287, 112271. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112271>
- Antonucci, F., Costa, C., 2020. Precision aquaculture: a short review on engineering innovations. *Aquacult Int* 28, 41–57. <https://doi.org/10.1007/s10499-019-00443-w>
- Artificial Intelligence Market Share, Forecast | Growth Analysis, Opportunities & Statistics [WWW Document], n.d. . MarketsandMarkets. URL <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/artificial-intelligence-market-74851580.html> (accessed 8.23.23).
- B, R., Kumar, S.S., 2016. Precision aquaculture drone algorithm for delivery in sea cages, in: 2016 IEEE International Conference on Engineering and Technology (ICETECH). Presented at the 2016 IEEE International Conference on Engineering and Technology (ICETECH), pp. 1264–1270. <https://doi.org/10.1109/ICETECH.2016.7569455>
- Bano, S., Sonnino, A., Al-Bassam, M., Azouvi, S., McCorry, P., Meiklejohn, S., Danezis, G., 2019. SoK: Consensus in the Age of Blockchains, in: Proceedings of the 1st ACM Conference on Advances in Financial Technologies, AFT '19. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, pp. 183–198. <https://doi.org/10.1145/3318041.3355458>
- Belton, B., Hein, A., Htoo, K., Kham, L.S., Phyo, A.S., Reardon, T., 2018. The emerging quiet revolution in Myanmar's aquaculture value chain. *Aquaculture* 493, 384–394. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2017.06.028>
- Bernal-Higuita, F., Acosta-Coll, M., Ballester-Merelo, F., De-la-Hoz-Franco, E., 2023. Implementation of information and communication technologies to increase sustainable productivity in freshwater finfish aquaculture – A review. *Journal of Cleaner Production* 408, 137124. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137124>
- Bishop, C., 2007. *Pattern Recognition and Machine Learning (Information Science and Statistics)*.
- Brewka, G., 1996. *Artificial intelligence—a modern approach* by Stuart Russell and Peter Norvig, Prentice Hall. Series in Artificial Intelligence, Englewood Cliffs, NJ. The Knowledge Engineering Review 11, 78–79. <https://doi.org/10.1017/S0269888900007724>
- Brynjolfsson, E., McAfee, A., 2014. *The Second Machine Age: Work, Progress, and Prosperity in a Time of Brilliant Technologies*. W. W. Norton & Company.
- Chang, C.-C., Ubina, N.A., Cheng, S.-C., Lan, H.-Y., Chen, K.-C., Huang, C.-C., 2022. A Two-Mode Underwater Smart Sensor Object for Precision Aquaculture Based on AIoT Technology. *Sensors* 22, 7603. <https://doi.org/10.3390/s22197603>
- Chang, Chung-Cheng, Wang, J.-H., Wu, J.-L., Hsieh, Y.-Z., Wu, T.-D., Cheng, S.-C., Chang, Chin-Chun, Juang, J.-G., Liou, C.-H., Hsu, T.-H., Huang, Y.-S., Huang, C.-T., Lin, C.-C., Peng, Y.-T., Huang, R.-J., Jhang, J.-Y., Liao, Y.-H., Lin, C.-Y., 2021. Applying Artificial Intelligence (AI) Techniques to Implement a Practical Smart Cage

- Aquaculture Management System. *J. Med. Biol. Eng.* 41, 652–658. <https://doi.org/10.1007/s40846-021-00621-3>
- Chen, J.C., Chen, T.-L., Wang, H.-L., Chang, P.-C., 2022. Underwater abnormal classification system based on deep learning: A case study on aquaculture fish farm in Taiwan. *Aquacultural Engineering* 99, 102290. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2022.102290>
- Chiu, M.-C., Yan, W.-M., Bhat, S.A., Huang, N.-F., 2022. Development of smart aquaculture farm management system using IoT and AI-based surrogate models. *Journal of Agriculture and Food Research* 9, 100357. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2022.100357>
- Chollet, F., 2017. Xception: Deep Learning with Depthwise Separable Convolutions, in: 2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Presented at the 2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), IEEE, Honolulu, HI, pp. 1800–1807. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2017.195>
- Devlin, J., Chang, M.-W., Lee, K., Toutanova, K., 2019. BERT: Pre-training of Deep Bidirectional Transformers for Language Understanding. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1810.04805>
- Elbadawi, M., McCoubrey, L.E., Gavins, F.K.H., Ong, J.J., Goyanes, A., Gaisford, S., Basit, A.W., 2021. Harnessing artificial intelligence for the next generation of 3D printed medicines. *Advanced Drug Delivery Reviews* 175, 113805. <https://doi.org/10.1016/j.addr.2021.05.015>
- Fagbémi, M.N.A., Pigneur, L.-M., André, A., Smitz, N., Gennotte, V., Michaux, J.R., Mélard, C., Lalèyè, P.A., Rougeot, C., 2021. Genetic structure of wild and farmed Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) populations in Benin based on genome wide SNP technology. *Aquaculture* 535, 736432. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2021.736432>
- Føre, M., Frank, K., Norton, T., Svendsen, E., Alfredsen, J.A., Dempster, T., Eguiraun, H., Watson, W., Stahl, A., Sunde, L.M., Schellewald, C., Skøien, K.R., Alver, M.O., Berckmans, D., 2018. Precision fish farming: A new framework to improve production in aquaculture. *Biosystems Engineering, Advances in the Engineering of Sensor-based Monitoring and Management Systems for Precision Livestock Farming* 173, 176–193. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.10.014>
- Garrard, R., Fielke, S., 2020. Blockchain for trustworthy provenances: A case study in the Australian aquaculture industry. *Technology in Society* 62, 101298. <https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2020.101298>
- Gladju, J., Kamalam, B.S., Kanagaraj, A., 2022. Applications of data mining and machine learning framework in aquaculture and fisheries: A review. *Smart Agricultural Technology* 2, 100061. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2022.100061>
- Gonçalves, D.N., Acosta, P.R., Ramos, A.P.M., Osco, L.P., Furuya, D.E.G., Furuya, M.T.G., Li, J., Junior, J.M., Pistori, H., Gonçalves, W.N., 2022. Using a convolutional neural network for fingerling counting: A multi-task learning approach. *Aquaculture* 557, 738334. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2022.738334>
- Goodfellow, I., Bengio, Y., Courville, A., 2016. *Deep Learning*. MIT Press.

- Graves, A., Mohamed, A., Hinton, G., 2013. Speech Recognition with Deep Recurrent Neural Networks. ICASSP, IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing - Proceedings 38. <https://doi.org/10.1109/ICASSP.2013.6638947>
- Grigorescu, S., Trasnea, B., Cocias, T., Macesanu, G., 2020. A survey of deep learning techniques for autonomous driving. *Journal of Field Robotics* 37, 362–386. <https://doi.org/10.1002/rob.21918>
- Gualtieri, L., Rauch, E., Vidoni, R., 2021. Emerging research fields in safety and ergonomics in industrial collaborative robotics: A systematic literature review. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 67, 101998. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2020.101998>
- Gutiérrez, E., Lozano, S., Guillén, J., 2020. Efficiency data analysis in EU aquaculture production. *Aquaculture* 520, 734962. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2020.734962>
- Hang, L., Ullah, I., Kim, D.-H., 2020. A secure fish farm platform based on blockchain for agriculture data integrity. *Computers and Electronics in Agriculture* 170, 105251. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105251>
- He, K., Zhang, X., Ren, S., Sun, J., 2016. Deep Residual Learning for Image Recognition, in: 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Presented at the 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), pp. 770–778. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2016.90>
- Henriksson, P.J.G., Troell, M., Banks, L.K., Belton, B., Beveridge, M.C.M., Klinger, D.H., Pelletier, N., Phillips, M.J., Tran, N., 2021. Interventions for improving the productivity and environmental performance of global aquaculture for future food security. *One Earth* 4, 1220–1232. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2021.08.009>
- Hinton, G., Deng, L., Yu, D., Dahl, G.E., Mohamed, A., Jaitly, N., Senior, A., Vanhoucke, V., Nguyen, P., Sainath, T.N., Kingsbury, B., 2012. Deep Neural Networks for Acoustic Modeling in Speech Recognition: The Shared Views of Four Research Groups. *IEEE Signal Processing Magazine* 29, 82–97. <https://doi.org/10.1109/MSP.2012.2205597>
- Hu, Z., Li, R., Xia, X., Yu, C., Fan, X., Zhao, Y., 2020. A method overview in smart aquaculture. *Environ Monit Assess* 192, 493. <https://doi.org/10.1007/s10661-020-08409-9>
- Ibáñez, M., Luna, M., Bosque, J.L., Beivide, R., 2023. Parallelisation of decision-making techniques in aquaculture enterprises. *J Supercomput* 79, 11827–11843. <https://doi.org/10.1007/s11227-023-05124-3>
- Igwegbe, C.A., Obi, C.C., Ohale, P.E., Ahmadi, S., Onukwuli, O.D., Nwabanne, J.T., Białowiec, A., 2023. Modelling and optimisation of electrocoagulation/flocculation recovery of effluent from land-based aquaculture by artificial intelligence (AI) approaches. *Environ Sci Pollut Res* 30, 70897–70917. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-27387-2>
- James, M., Mendo, T., Jones, E.L., Orr, K., McKnight, A., Thompson, J., 2018. AIS data to inform small scale fisheries management and marine spatial planning. *Marine Policy* 91, 113–121. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2018.02.012>

- Janiesch, C., Zschech, P., Heinrich, K., 2021. Machine learning and deep learning. *Electron Markets* 31, 685–695. <https://doi.org/10.1007/s12525-021-00475-2>
- Jarrahi, M.H., 2018. Artificial Intelligence and the Future of Work: Human-AI Symbiosis in Organizational Decision Making. *Business Horizons* 61. <https://doi.org/10.1016/j.bushor.2018.03.007>
- Jiang, Y., Li, X., Luo, H., Yin, S., Kaynak, O., 2022. Quo vadis artificial intelligence? *Discov Artif Intell* 2, 4. <https://doi.org/10.1007/s44163-022-00022-8>
- Karimanzira, D., Jacobi, M., Pfuetzenreuter, T., Rauschenbach, T., Eichhorn, M., Taubert, R., Ament, C., 2014. First testing of an AUV mission planning and guidance system for water quality monitoring and fish behavior observation in net cage fish farming. *Information Processing in Agriculture* 1, 131–140. <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2014.12.001>
- Kaynak, O., 2021. The golden age of Artificial Intelligence. *Discov Artif Intell* 1, 1. <https://doi.org/10.1007/s44163-021-00009-x>
- Kolarevic, J., Aas-Hansen, Ø., Espmark, Å., Baeverfjord, G., Terjesen, B.F., Damsgård, B., 2016. The use of acoustic acceleration transmitter tags for monitoring of Atlantic salmon swimming activity in recirculating aquaculture systems (RAS). *Aquacultural Engineering* 72–73, 30–39. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2016.03.002>
- Kotsiantis, S.B., 2007. Supervised machine learning: A review of classification techniques. *Informatica (Ljubljana)* 31, 249–268.
- Le Féon, S., Dubois, T., Jaeger, C., Wilfart, A., Akkal-Corfini, N., Bacenetti, J., Costantini, M., Aubin, J., 2021. DEXiAqua, a Model to Assess the Sustainability of Aquaculture Systems: Methodological Development and Application to a French Salmon Farm. *Sustainability* 13, 7779. <https://doi.org/10.3390/su13147779>
- LeCun, Y., Bengio, Y., Hinton, G., 2015. Deep learning. *Nature* 521, 436–444. <https://doi.org/10.1038/nature14539>
- Lee, P.G., 1995. A review of automated control systems for aquaculture and design criteria for their implementation. *Aquacultural Engineering* 14, 205–227. [https://doi.org/10.1016/0144-8609\(94\)00002-I](https://doi.org/10.1016/0144-8609(94)00002-I)
- Li, D., Miao, Z., Peng, F., Wang, L., Hao, Y., Wang, Z., Chen, T., Li, H., Zheng, Y., 2021. Automatic counting methods in aquaculture: A review. *Journal of the World Aquaculture Society* 52, 269–283. <https://doi.org/10.1111/jwas.12745>
- Li, T., Lu, J., Wu, J., Zhang, Z., Chen, L., 2022. Predicting Aquaculture Water Quality Using Machine Learning Approaches. *Water* 14, 2836. <https://doi.org/10.3390/w14182836>
- Lopes, B.D.M., Silva, L.C.B., Blanquet, I.M., Georgieva, P., Marques, C.A.F., 2021. Prediction of fish mortality based on a probabilistic anomaly detection approach for recirculating aquaculture system facilities. *Review of Scientific Instruments* 92, 025119. <https://doi.org/10.1063/5.0045047>
- Lu, H.-Y., Cheng, C.-Y., Cheng, S.-C., Cheng, Y.-H., Lo, W.-C., Jiang, W.-L., Nan, F.-H., Chang, S.-H., Ubina, N.A., 2022. A Low-Cost AI Buoy System for Monitoring Water Quality at Offshore Aquaculture Cages. *Sensors* 22, 4078. <https://doi.org/10.3390/s22114078>

- Lu, P., Li, Z., Cheng, B., Lei, R., Zhang, R., 2010. Sea ice surface features in Arctic summer 2008: Aerial observations. *Remote Sensing of Environment* 114, 693–699. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.11.009>
- Lu, R., Hong, S., 2019. Incentive-based demand response for smart grid with reinforcement learning and deep neural network. *Applied Energy* 236, 937–949. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.12.061>
- Madani, A., Arnaout, Ramy, Mofrad, M., Arnaout, Rima, 2018. Fast and accurate view classification of echocardiograms using deep learning. *npj Digital Med* 1, 1–8. <https://doi.org/10.1038/s41746-017-0013-1>
- Martins, C.I.M., Eding, E.H., Verdegem, M.C.J., Heinsbroek, L.T.N., Schneider, O., Blancheton, J.P., d’Orbcastel, E.R., Verreth, J.A.J., 2010. New developments in recirculating aquaculture systems in Europe: A perspective on environmental sustainability. *Aquacultural Engineering* 43, 83–93. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2010.09.002>
- Mathew, A., Amudha, P., Sivakumari, S., 2021. Deep Learning Techniques: An Overview, in: Hassanien, A.E., Bhatnagar, R., Darwish, A. (Eds.), *Advanced Machine Learning Technologies and Applications, Advances in Intelligent Systems and Computing*. Springer, Singapore, pp. 599–608. https://doi.org/10.1007/978-981-15-3383-9_54
- Menouar, H., Guvenc, I., Akkaya, K., Uluagac, S., Kadri, A., Tuncer, A., 2017. UAV-Enabled Intelligent Transportation Systems for the Smart City: Applications and Challenges. *IEEE Communications Magazine* 55, 22–28. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2017.1600238CM>
- Natsuike, M., Natsuike, Y., Kanamori, M., Honke, K., 2022. Semi-automatic recognition of juvenile scallops reared in lantern nets from time-lapse images using a deep learning technique. *Plankton and Benthos Research* 17, 91–94. <https://doi.org/10.3800/pbr.17.91>
- Nava, F., n.d. Diagnóstico de la Acuicultura de Recursos Limitados (AREL) y de la Acuicultura de la Micro y Pequeña Empresa (AMYPE) en América Latina.
- Nicheva, S., Waldo, S., Nielsen, R., Lasner, T., Guillen, J., Jackson, E., Motova, A., Cozzolino, M., Lamprakis, A., Zhelev, K., Llorente, I., 2022. Collecting demographic data for the EU aquaculture sector: What can we learn? *Aquaculture* 559, 738382. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2022.738382>
- O’Donncha, F., Grant, J., 2019. Precision Aquaculture. *IEEE Internet of Things Magazine* 2, 26–30. <https://doi.org/10.1109/IOTM.0001.1900033>
- Palagi, S., Fischer, P., 2018. Bioinspired microrobots. *Nat Rev Mater* 3, 113–124. <https://doi.org/10.1038/s41578-018-0016-9>
- Ploennigs, J., Cohn, J., Stanford-Clark, A., 2018. The Future of IoT. *IEEE Internet of Things Magazine* 1, 28–33. <https://doi.org/10.1109/IOTM.2018.1700021>
- R, G., F, M. (Eds.), 2006. *Livestock production and society*. Wageningen Academic Publishers. <https://doi.org/10.3920/978-90-8686-567-3>
- Ranjan, R., Sharrer, K., Tsukuda, S., Good, C., 2023. MortCam: An Artificial Intelligence-aided fish mortality detection and alert system for recirculating aquaculture.

- Aquacultural Engineering 102, 102341.
<https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2023.102341>
- Rasheed Abdul Haq, K.P., Harigovindan, V.P., 2022. Water Quality Prediction for Smart Aquaculture Using Hybrid Deep Learning Models. *IEEE Access* 10, 60078–60098.
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3180482>
- Raza, M.Q., Khosravi, A., 2015. A review on artificial intelligence based load demand forecasting techniques for smart grid and buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 50, 1352–1372. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.065>
- Rowan, N.J., 2023. The role of digital technologies in supporting and improving fishery and aquaculture across the supply chain – Quo Vadis? *Aquaculture and Fisheries, SI: Improving fish from catch to the consumer: Post harvest handling, processing, packaging, transportation and storage* 8, 365–374.
<https://doi.org/10.1016/j.aaf.2022.06.003>
- Rudin, C., 2019. Stop explaining black box machine learning models for high stakes decisions and use interpretable models instead. *Nat Mach Intell* 1, 206–215.
<https://doi.org/10.1038/s42256-019-0048-x>
- Ryan, P.J., Watson, R.B., 2017. Research Challenges for the Internet of Things: What Role Can OR Play? *Systems* 5, 24. <https://doi.org/10.3390/systems5010024>
- Sharma, D., Kumar, R., 2021. Smart Aquaculture: Integration of Sensors, Biosensors, and Artificial Intelligence, in: Pudake, R.N., Jain, U., Kole, C. (Eds.), *Biosensors in Agriculture: Recent Trends and Future Perspectives, Concepts and Strategies in Plant Sciences*. Springer International Publishing, Cham, pp. 455–464.
https://doi.org/10.1007/978-3-030-66165-6_21
- Silver, D., Hubert, T., Schrittwieser, J., Antonoglou, I., Lai, M., Guez, A., Lanctot, M., Sifre, L., Kumaran, D., Graepel, T., Lillicrap, T., Simonyan, K., Hassabis, D., 2018. A general reinforcement learning algorithm that masters chess, shogi, and Go through self-play. *Science* 362, 1140–1144. <https://doi.org/10.1126/science.aar6404>
- Sutskever, I., Vinyals, O., Le, Q.V., 2014. Sequence to Sequence Learning with Neural Networks, in: *Advances in Neural Information Processing Systems*. Curran Associates, Inc.
- Taheri-Garavand, A., Fatahi, S., Banan, A., Makino, Y., 2019. Real-time nondestructive monitoring of Common Carp Fish freshness using robust vision-based intelligent modeling approaches. *Computers and Electronics in Agriculture* 159, 16–27.
<https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.02.023>
- Tolentino-Zondervan, F., Ngoc, P.T.A., Roskam, J.L., 2023. Use cases and future prospects of blockchain applications in global fishery and aquaculture value chains. *Aquaculture* 565, 739158. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2022.739158>
- Tsai, K.-L., Chen, L.-W., Yang, L.-J., Shiu, H.-J., Chen, H.-W., 2022. IoT based Smart Aquaculture System with Automatic Aerating and Water Quality Monitoring. *Journal of Internet Technology* 23, 177–184.
- Ubina, N., Cheng, S.-C., Chang, C.-C., Chen, H.-Y., 2021. Evaluating fish feeding intensity in aquaculture with convolutional neural networks. *Aquacultural Engineering* 94, 102178. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2021.102178>

- Ubina, N.A., Cheng, S.-C., Chen, H.-Y., Chang, C.-C., Lan, H.-Y., 2021. A Visual Aquaculture System Using a Cloud-Based Autonomous Drones. *Drones* 5, 109. <https://doi.org/10.3390/drones5040109>
- Vo, T.T.E., Ko, H., Huh, J.-H., Kim, Y., 2021. Overview of Smart Aquaculture System: Focusing on Applications of Machine Learning and Computer Vision. *Electronics* 10, 2882. <https://doi.org/10.3390/electronics10222882>
- Wang, C., Li, Z., Wang, T., Xu, X., Zhang, X., Li, D., 2021. Intelligent fish farm—the future of aquaculture. *Aquacult Int* 29, 2681–2711. <https://doi.org/10.1007/s10499-021-00773-8>
- Wang, Y., Qi, C., Pan, H., 2012. Design of Remote Monitoring System for Aquaculture Cages Based on 3G Networks and ARM-Android Embedded System. *Procedia Engineering*, 2012 International Workshop on Information and Electronics Engineering 29, 79–83. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.12.672>
- Wei, Y., Wei, Q., An, D., 2020. Intelligent monitoring and control technologies of open sea cage culture: A review. *Computers and Electronics in Agriculture* 169, 105119. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.105119>
- Wu, Y., Duan, Y., Wei, Y., An, D., Liu, J., 2022. Application of intelligent and unmanned equipment in aquaculture: A review. *Computers and Electronics in Agriculture* 199, 107201. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107201>
- Yadav, A., Noori, M.T., Biswas, A., Min, B., 2023. A Concise Review on the Recent Developments in the Internet of Things (IoT)-Based Smart Aquaculture Practices. *Reviews in Fisheries Science & Aquaculture* 31, 103–118. <https://doi.org/10.1080/23308249.2022.2090228>
- Yang, J., Jia, L., Guo, Z., Shen, Y., Li, X., Mou, Z., Yu, K., Lin, J.C.-W., 2023. Prediction and control of water quality in Recirculating Aquaculture System based on hybrid neural network. *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 121, 106002. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2023.106002>
- Yang, L., Liu, Y., Yu, H., Fang, X., Song, L., Li, D., Chen, Y., 2021. Computer Vision Models in Intelligent Aquaculture with Emphasis on Fish Detection and Behavior Analysis: A Review. *Arch Computat Methods Eng* 28, 2785–2816. <https://doi.org/10.1007/s11831-020-09486-2>
- Yu, C., Hu, Z., Han, B., Dai, Y., Zhao, Y., Deng, Y., 2023. An intelligent measurement scheme for basic characters of fish in smart aquaculture. *Computers and Electronics in Agriculture* 204, 107506. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107506>
- Yu, K.-H., Beam, A.L., Kohane, I.S., 2018. Artificial intelligence in healthcare. *Nat Biomed Eng* 2, 719–731. <https://doi.org/10.1038/s41551-018-0305-z>
- Yue, K., Shen, Y., 2022. An overview of disruptive technologies for aquaculture. *Aquaculture and Fisheries, SI: Emerging and disruptive technologies for aquaculture* 7, 111–120. <https://doi.org/10.1016/j.aaf.2021.04.009>
- Zhang, B., Zhu, J., Su, H., 2023. Toward the third generation artificial intelligence. *Sci. China Inf. Sci.* 66, 121101. <https://doi.org/10.1007/s11432-021-3449-x>

- Zhang, Lefei, Zhang, Liangpei, 2022. Artificial Intelligence for Remote Sensing Data Analysis: A review of challenges and opportunities. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine* 10, 270–294. <https://doi.org/10.1109/MGRS.2022.3145854>
- Zhang, Y., Ling, C., 2018. A strategy to apply machine learning to small datasets in materials science. *npj Comput Mater* 4, 1–8. <https://doi.org/10.1038/s41524-018-0081-z>
- Zhao, S., Zhang, S., Liu, J., Wang, H., Zhu, J., Li, D., Zhao, R., 2021. Application of machine learning in intelligent fish aquaculture: A review. *Aquaculture* 540, 736724. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2021.736724>

6.ABSTRACT

Aquaculture produces about 50% of the fish consumed worldwide. With fisheries facing increasing problems as fishing pressure depletes fish stocks, aquaculture is being called upon to increase production even further, in order to meet the ever-increasing fish demands of the human population. The increase in production should be combined with good living conditions for the fish, keeping the price of the final product within reasonable limits, as well as with a high quality final product. To achieve these goals, new technologies such as artificial intelligence, the Internet of Things, blockchains, etc. can be implemented and play an important role. Artificial intelligence in particular, and more specific fields of it (Machine Learning, Deep Learning), which is already experiencing rapid development in many industries, enables further improvements in aquaculture. Artificial Intelligence can be applied to programs that can calculate the feeding intensity in a cage, measure the physico-chemical conditions of the environment, but also predict them, offering advice for the management of the unit. They can also contribute to the early treatment of diseases in aquaculture by identifying fish with health problems, reducing the number of dead fish during rearing. These developments can improve aquaculture drastically if it continues to evolve, making widespread implementation easier.

Keywords: Artificial Intelligence, Automated Aquaculture, New Technologies,
Machine Learning