ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ (Δ.Π.Μ.Σ.)
«ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗ»

Μεταπτυχιακή (Διπλωματική) Εργασία

Τίτλος: Βιώσιμη Λειτουργία και Χωροθέτηση Μονάδων Υδατοκαλλιέργειας: Αξιολόγηση Βιωσιμότητας Κύκλου Ζωής στο Πλαίσιο του Χωρικού Σχεδιασμού

Όνομα ΜΦ Δεληπέτρος Δημήτριος

Επιβλέπων: Δρ. Λέκα Ακριβή,

ΕΔΙΠ ΣΑΤΜ, ΕΜΠ

Μέλη Εξετ. Επιτροπής: Μπακογιάννης
Ευθύμιος Αναπληρωτής Καθηγητής ΣΑΤΜ ΕΜΠ,
Χατζηχρήστος Θωμάς Επίκουρος Καθηγητής ΣΑΤΜ ΕΜΠ

Αθήνα, 2026

Περιβάλλον

και

Ανάπτυξη

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία εξετάζει τον ρόλο του χωρικού σχεδιασμού στην οργάνωση, ρύθμιση και βιώσιμη ανάπτυξη της υδατοκαλλιέργειας, με έμφαση στο ελληνικό θεσμικό και χωροταξικό πλαίσιο. Η υδατοκαλλιέργεια αποτελεί έναν από τους δυναμικότερους κλάδους του πρωτογενούς τομέα, με σημαντική συμβολή στην παραγωγή τροφίμων, στην απασχόληση, στις εξαγωγές και στην οικονομική ανάπτυξη παράκτιων και νησιωτικών περιοχών. Παράλληλα, όμως, η δραστηριότητα αυτή συνδέεται με ζητήματα περιβαλλοντικής διαχείρισης, συγκρούσεις χρήσεων γης και θάλασσας, κοινωνικές αντιδράσεις και ανάγκη ορθολογικής χωροθέτησης.

Στο πλαίσιο της εργασίας πραγματοποιείται αξιολόγηση της βιωσιμότητας μιας μονάδας παραγωγής υδατοκαλλιέργειας μέσω της προσέγγισης του κύκλου ζωής, με σκοπό την εκτίμηση των βασικών επιπτώσεων που προκύπτουν κατά μήκος της παραγωγικής αλυσίδας. Η ανάλυση δεν περιορίζεται μόνο στο στάδιο της εκτροφής, αλλά εξετάζει συνολικά τη διαδρομή του προϊόντος, από την παραγωγή στη μονάδα υδατοκαλλιέργειας έως τη συσκευασία, τη μεταφορά και τη διάθεσή του στην αγορά. Με τον τρόπο αυτό εντοπίζονται τα στάδια που επιβαρύνουν περισσότερο το σύστημα και αναδεικνύονται τα βασικά σημεία στα οποία μπορούν να εφαρμοστούν παρεμβάσεις βελτίωσης.

Η προσέγγιση της βιωσιμότητας μιας τυπικής μονάδας υδατοκαλλιέργειας βασίζεται σε τρεις διαστάσεις: την περιβαλλοντική, την οικονομική και την κοινωνική. Στο περιβαλλοντικό σκέλος εξετάζονται οι επιπτώσεις που σχετίζονται με την κατανάλωση ενέργειας, τις μεταφορές, τη χρήση ζωοτροφών, τη λειτουργία της μονάδας και γενικότερα τις εκπομπές και πιέσεις που προκύπτουν από την παραγωγική διαδικασία. Στο οικονομικό σκέλος αξιολογούνται τα βασικά κόστη της παραγωγής, όπως οι ζωοτροφές, ο γόνος, η ενέργεια, η συσκευασία και η διανομή, ώστε να αποτυπωθεί η οικονομική αποδοτικότητα και οι κύριοι παράγοντες κόστους. Παράλληλα, στο κοινωνικό σκέλος εξετάζονται ζητήματα που αφορούν την εργασία, την υγεία και ασφάλεια, τη σχέση με την τοπική κοινωνία και τη γενικότερη κοινωνική αποδοχή της δραστηριότητας.

Η συμβολή της εργασίας στον χωρικό σχεδιασμό έγκειται στο ότι η Αξιολόγηση Βιωσιμότητας Κύκλου Ζωής μπορεί να λειτουργήσει ως συμπληρωματικό εργαλείο τεκμηρίωσης για την επιλογή και αξιολόγηση θέσεων εγκατάστασης μονάδων υδατοκαλλιέργειας. Συνδέοντας τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις, τα οικονομικά κόστη και τις κοινωνικές παραμέτρους της παραγωγικής αλυσίδας με τα χωρικά χαρακτηριστικά μιας περιοχής, η μεθοδολογία συμβάλλει στην ανάδειξη κριτηρίων χωροθέτησης που δεν περιορίζονται μόνο στη φυσική καταλληλότητα του θαλάσσιου χώρου, αλλά λαμβάνουν υπόψη τη συνολική βιωσιμότητα της δραστηριότητας. Με τον τρόπο αυτό, η εργασία ενισχύει την ανάγκη για έναν πιο ολοκληρωμένο χωρικό σχεδιασμό, ο οποίος στηρίζεται σε μετρήσιμα δεδομένα, προλαμβάνει περιβαλλοντικές πιέσεις, περιορίζει συγκρούσεις χρήσεων και υποστηρίζει τη μακροχρόνια βιώσιμη λειτουργία των μονάδων.

Λέξεις-κλειδιά: Ανάλυση Κύκλου Ζωής, βιωσιμότητα, υδατοκαλλιέργεια, χωρικός σχεδιασμός, χωροταξικός σχεδιασμός, βιώσιμη ανάπτυξη

ABSTRACT

This thesis examines the role of spatial planning in the organization, regulation and sustainable development of aquaculture, with emphasis on the Greek institutional and spatial planning framework. Aquaculture is one of the most dynamic sectors of primary production, contributing significantly to food production, employment, exports and the economic development of coastal and island areas. At the same time, however, this activity is associated with issues of environmental management, conflicts over land and sea uses, social opposition and the need for rational siting.

Within the framework of this thesis, the sustainability of an aquaculture production unit is assessed through a life-cycle approach, aiming to evaluate the main impacts arising throughout the production chain. The analysis is not limited only to the farming stage, but examines the overall pathway of the product, from production at the aquaculture unit to packaging, transport and distribution to the market. In this way, the stages that place the greatest burden on the system are identified, while the key points where improvement measures can be implemented are highlighted.

The sustainability assessment of a typical aquaculture unit is based on three dimensions: environmental, economic and social. The environmental dimension examines impacts related to energy consumption, transport, feed use, unit operation and, more generally,

the emissions and pressures resulting from the production process. The economic dimension evaluates the main production costs, such as feed, juveniles, energy, packaging and distribution, in order to capture economic efficiency and the key cost drivers. At the same time, the social dimension examines issues related to labour, health and safety, relations with the local community and the broader social acceptance of the activity.

The contribution of this thesis to spatial planning lies in the fact that Life Cycle Sustainability Assessment can function as a complementary evidence-based tool for the selection and evaluation of suitable sites for aquaculture units. By linking environmental impacts, economic costs and social parameters of the production chain with the spatial characteristics of an area, the methodology contributes to the development of siting criteria that are not limited solely to the physical suitability of the marine space, but also take into account the overall sustainability of the activity. In this way, the thesis reinforces the need for a more integrated spatial planning approach, based on measurable data, capable of preventing environmental pressures, reducing conflicts between uses and supporting the long-term sustainable operation of aquaculture units.

Keywords: Life Cycle Assessment, sustainability, aquaculture, spatial planning, land-use planning, sustainable development.

.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Πρώτιστα, θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στην επιβλέπουσα καθηγήτριά μου, Δρ. Ακριβή Λέκα, για την ουσιαστική καθοδήγηση, τη διαρκή στήριξη και την εμπιστοσύνη που μου έδειξε καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου στο Διατμηματικό Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα «Περιβάλλον και Ανάπτυξη» και κατά την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Η παρουσία της υπήρξε για εμένα ιδιαίτερα σημαντική, καθώς με βοήθησε όχι μόνο στην ολοκλήρωση της εργασίας, αλλά και για τη διαμόρφωση του τρόπου με τον οποίο αντιλαμβάνομαι την επιστημονική συνέπεια, το ήθος και την υπευθυνότητα και στο ξεκίνημα της επαγγελματικής μου διαδρομής..

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω θερμά στην οικογένειά μου και τους δικούς μου ανθρώπους για τη υποστήριξη και την υπομονή που στάθηκαν δίπλα μου σε όλη αυτή την προσπάθεια και σε κάθε στάδιο της ακαδημαϊκής μου πορείας.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ 10

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. Χωρικός Σχεδιασμός και Υδατοκαλλιέργειες 11

1.1. Εισαγωγή 11

1.2. Θεσμικό πλαίσιο σε ευρωπαϊκό επίπεδο 14

1.2.1. Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία, Στρατηγική «Από το Αγρόκτημα στο Πιάτο» και Στόχοι Βιώσιμης Ανάπτυξης του ΟΗΕ σε σύνδεση με τον χωρικό σχεδιασμό και τις υδατοκαλλιέργειες 20

1.3. Θεσμικό πλαίσιο σε εθνικό επίπεδο (Ελλάδα) 24

1.4. Εθνικό επίπεδο: Θεσμική εξέλιξη, χωροταξικά εργαλεία και εφαρμογή στην Ελλάδα 26

1.4.1 Βιωσιμότητα στις υδατοκαλλιέργειες και ανάγκη συστηματικής αξιολόγησης 38

1.4.2. Βέλτιστες πρακτικές για τη βιώσιμη διαχείριση και αξιολόγηση της αλιείας και της υδατοκαλλιέργειας 42

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. Υδατοκαλλιέργειες και Περιβαλλοντικές Επιπτώσεις 50

2.1. Εισαγωγή: από τη βιωσιμότητα στην αξιολόγηση περιβαλλοντικών επιπτώσεων 50

2.2. Μέθοδοι Εκτίμησης Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων 52

2.2.1. Μελέτες και Σκοπός Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων (Environmental Impact Assessment) 53

2.2.2. Ανάλυση Κόστους- Οφέλους (Cost Benefit-Analysis) 56

2.2.3. Μέθοδος Πολυκριτηριακής Ανάλυσης (Multi-Criteria Decision Analysis, MCDA) 57

2.2.4. Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών G.I.S. (Geographic Information Systems) 58

2.2.5. Περιβαλλοντικοί Δείκτες (Environmental Performance Index, EPI) 59

2.2.6. Ανάλυση κύκλου ζωής (Life Cycle Assessment LCA) 60

2.2.7. Μεθοδολογία Ανάλυσης Κύκλου Ζωής 61

2.2. Βασικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις των υδατοκαλλιεργειών 64

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. Μελέτη Περίπτωσης : Ιχθυοκαλλιέργεια Τσιπούρας 69

3.1. Στόχος της Μελέτης 69

3.2. Πεδίο Εφαρμογής και Περιορισμοί 71

3.3. Μεθοδολογικό πλαίσιο 72

3.4. Μεθοδολογικό Πλαίσιο 74

3.4.1. Επισκόπηση της Αξιολόγησης Βιωσιμότητας Κύκλου Ζωής (LCSA) 74
3.4.2. Ενσωμάτωση LCA, LCC και S-LCA 75
3.5. Μελέτη Περίπτωσης: Υδατοκαλλιέργεια Τσιπούρας 78
3.5.1 Λειτουργική Περιγραφή της Μονάδας 78
3.5.2. Λειτουργική Μονάδα και Όρια Συστήματος 79
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. Περιβαλλοντική Αξιολόγηση — Ανάλυση Κύκλου Ζωής (Life Cycle Analysis - LCA) 81
4.1. Ορισμός στόχου και πεδίου εφαρμογής 81
4.2. Ανάλυση Απογραφής (LCI) 84
4.3. Εκτίμηση Επιπτώσεων (Ανάλυση Επιπτώσεων Κύκλου Ζωής -- LCIA) 86
4.5. Αναφορά και Οπτικοποίηση Αποτελεσμάτων 88
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. Οικονομική Αξιολόγηση (LCC) και Κοινωνική Αξιολόγηση (SLCA) .. 94
5.1. Ανάλυση Κόστους Κύκλου Ζωής (LCC) — Μέθοδοι, Παραδοχές και Αποτελέσματα 94
5.1.1. Στόχος και πεδίο εφαρμογής 94
5.1.2. Αποτελέσματα 96
5.1.3. Ανάλυση ευαισθησίας 97
5.1.4. Παραδοχές και περιορισμοί 97
5.2. Κοινωνική Αξιολόγηση Κύκλου Ζωής (Social Life-Cycle Assessment - S-LCA) 98
5.2.1 Σκοπός και προσέγγιση 98
5.2.2. Ευρήματα ανά ομάδα ενδιαφερόμενων μερών 99
5.2.3. Μεθοδολογική σημείωση και ποιότητα δεδομένων 101
5.2.4 Αποτελέσματα και ερμηνεία 104
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6. Συζήτηση και Συμπεράσματα 106
6.1. Συμβολή στον Σχεδιασμό και στη Λήψη Αποφάσεων 107
6.2. Μεθοδολογική συμβολή 109
6.3. Προτάσεις βελτίωσης 111
7. Βιβλιογραφία 114
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8. Παράρτημα 126
8.1. Λεπτομερής Πίνακες Καταγραφής 126
8.2. Συμπληρωματικά Αποτελέσματα Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων 136

Εικόνα 1: Οι 17 Στόχοι Βιώσιμης Ανάπτυξης των Ηνωμένων Εθνών (Carr et al. (2021)) 19
Εικόνα 2: Στάδια Ανάλυσης Κύκλου Ζωής 62
Εικόνα 3: Σύστημα προϊόντος από την «κούνια έως τον καταναλωτή», συμπεριλαμβανομένων των αναγκαίων μοναδιαίων διεργασιών για την παραγωγή τσιπούρας στην Ελλάδα 84
Εικόνα 4: Flowchart endpoint αποτελέσματα 89
Εικόνα 5: Recipe Hierarchrist endpoint normalization 91
Εικόνα 6: Hierarchrist midpoint normalization 92
Εικόνα 7: Εικόνα 6: Recipe Egalitarian endpoint normalization 92
Εικόνα 8: Recipe Egalitarian midpoint normalization 93
Εικόνα 9: CLM Normalazation 93
Εικόνα 10: Διάγραμμα waterfall για την S-LCA 104

Πίνακας 1: Συγκεντρωτικός πίνακας ελληνική νομοθεσίας 33
Πίνακας 2: Κύρια σημεία των βέλτιστων πρακτικών 48
Πίνακας 3: Απογραφή για την LCC. Πηγή: ιδία επεξεργασία με βάση RAE (2024), Fuelprices.gr (2024), EYDAP (2024), EUMOFA — EU Fish Market Reports (2024), και Henriksson PJG et al. (2015). 96
Πίνακας 4: Απογραφή για την LCC. Πηγή: ιδία επεξεργασία με βάση RAE (2024), Fuelprices.gr (2024), ΕΥΔΑΠ (2024), EUMOFA, EU Fish Feed Market Reports (2024), Henriksson PJG et al. (2015). 102
Πίνακας 5: Δεδομένα υπολογισμού για τον SPI, ιδία επεξεργασία 103

Εξίσωση 1:Μαθηματικός τύπος εξίσωσης ανάλυσης κόστους-οφέλους 47
Εξίσωση 2: Μαθηματική συνάρτηση για τον SPI 101

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ταχεία επέκταση των υδατοκαλλιεργειών τις τελευταίες δεκαετίες έχει διαδραματίσει καθοριστικό ρόλο στην εξασφάλιση παγκόσμιας προσφοράς θαλασσινών εν μέσω της αυξανόμενης πίεση στους φυσικού πόρους της αλιευτικής δραστηριότητας. Στην περιοχή της Μεσογείου ιδιαίτερα, η κτηνοτροφία της τσιπούρας (Sparus aurata) αποτελεί κεντρικό στοιχείο της θαλάσσιας υδατοκαλλιέργειας και παρέχει σημαντική οικονομική και διατροφική αξία. Ωστόσο, η εντατικοποίηση της των συστημάτων παραγωγής έχουν προκαλέσει αυξανόμενες ανησυχίες σχετικά με τις περιβαλλοντικές τους επιδόσεις, ιδιαίτερα σε ευαίσθητα παράκτια και νησιωτικά οικοσυστήματα. Στο πλαίσιο αυτό, η αξιολόγηση του κύκλου ζωής (AKZ) αναδύεται ως μια ισχυρή, ISO-τυποποιημένη μεθοδολογία (ISO 14040/44) για την ποσοτικοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που συνδέονται με την παραγωγή θαλασσινών, που καλύπτουν από την προμήθεια ζωοτροφών, δραστηριότητες εκτροφής πάχυνσης και εκπομπές αποβλήτων.

Παράλληλα, η προσέγγιση της Αξιολόγησης Κύκλου Ζωής μπορεί να λειτουργήσει ως εργαλείο υποστήριξης του χωρικού σχεδιασμού των μονάδων υδατοκαλλιέργειας, καθώς συνδέει την επιλογή θέσης με την περιβαλλοντική, οικονομική και κοινωνική επίδοση της δραστηριότητας. Σε περιβαλλοντικό επίπεδο, μπορεί να συμβάλει στην εκτίμηση των επιπτώσεων που σχετίζονται με την κατανάλωση πόρων, τις εκπομπές, τη διαχείριση αποβλήτων και την πίεση στο θαλάσσιο οικοσύστημα. Σε οικονομικό επίπεδο, επιτρέπει τη συνεκτίμηση παραμέτρων όπως η πρόσβαση σε υποδομές, το κόστος μεταφορών, η ενεργειακή κατανάλωση και η λειτουργική αποδοτικότητα της μονάδας. Σε κοινωνικό επίπεδο, αναδεικνύει ζητήματα συμβατότητας με άλλες χρήσεις του παράκτιου χώρου, κοινωνικής αποδοχής και συμβολής στην τοπική ανάπτυξη. Με τον τρόπο αυτό, η χωροθέτηση δεν αντιμετωπίζεται μόνο ως τεχνική ή διοικητική διαδικασία, αλλά ως πολυκριτηριακή απόφαση βιωσιμότητας που μπορεί να μειώσει τις περιβαλλοντικές πιέσεις, να περιορίσει τις συγκρούσεις χρήσεων και να ενισχύσει τη μακροχρόνια βιώσιμη λειτουργία των μονάδων

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. Χωρικός Σχεδιασμός και Υδατοκαλλιέργειες

1.1. Εισαγωγή

Ο χωρικός σχεδιασμός αποτελεί θεμελιώδη διαδικασία οργάνωσης του χώρου και ρύθμισης των ανθρώπινων δραστηριοτήτων, με σκοπό τη διασφάλιση της ισορροπίας μεταξύ οικονομικής ανάπτυξης, κοινωνικής συνοχής και προστασίας του περιβάλλοντος. Στη σύγχρονη περιβαλλοντική πολιτική, ο χωρικός σχεδιασμός αντιμετωπίζεται ως εργαλείο στρατηγικής διαχείρισης φυσικών πόρων και ελέγχου των πιέσεων που ασκούνται στα οικοσυστήματα από τις ανθρώπινες δραστηριότητες (European Union, 2012). Η σημασία του καθίσταται ιδιαίτερα έντονη στις παράκτιες και θαλάσσιες περιοχές, όπου συνυπάρχουν πολλαπλές χρήσεις, όπως η αλιεία, ο τουρισμός, η ναυσιπλοΐα, οι λιμενικές δραστηριότητες, οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και οι υδατοκαλλιέργειες. (https://www.un.org/en/academic-impact/sustainability). Η έννοια της βιώσιμης ανάπτυξης συνδέεται άμεσα με τον χωρικό σχεδιασμό, καθώς η ορθολογική κατανομή δραστηριοτήτων στον χώρο αποτελεί βασική προϋπόθεση για την προστασία των φυσικών πόρων και τη διατήρηση της οικολογικής ισορροπίας. Η βιώσιμη ανάπτυξη ορίστηκε επισήμως στην Έκθεση Brundtland ως «η ανάπτυξη που καλύπτει τις ανάγκες του παρόντος χωρίς να υπονομεύει τη δυνατότητα των μελλοντικών γενεών να καλύψουν τις δικές τους ανάγκες» (World Commission on Environment and Development [WCED], 1987). Ο ορισμός αυτός αποτέλεσε τη βάση για την ενσωμάτωση περιβαλλοντικών παραμέτρων στις αναπτυξιακές και χωροταξικές πολιτικές διεθνώς.

Η βιώσιμη ανάπτυξη βασίζεται σε τρεις αλληλένδετους πυλώνες: την οικονομική ανάπτυξη, την κοινωνική ευημερία και την περιβαλλοντική προστασία (United Nations, 2015). Η περιβαλλοντική διάσταση αφορά την προστασία της βιοποικιλότητας και των οικοσυστημάτων, η οικονομική διάσταση σχετίζεται με τη διατήρηση της παραγωγικής δραστηριότητας χωρίς εξάντληση των φυσικών πόρων, ενώ η κοινωνική διάσταση αφορά την ποιότητα ζωής, τη δίκαιη κατανομή πόρων και την κοινωνική συνοχή. Ο χωρικός σχεδιασμός λειτουργεί ως το μέσο εφαρμογής αυτών των αρχών, καθώς καθορίζει τη χωρική κατανομή δραστηριοτήτων βάσει περιβαλλοντικών και κοινωνικοοικονομικών κριτηρίων. Η ανάγκη εφαρμογής ολοκληρωμένου χωρικού σχεδιασμού στις παράκτιες περιοχές είναι ιδιαίτερα σημαντική λόγω της υψηλής συγκέντρωσης ανθρωπογενών δραστηριοτήτων και της περιβαλλοντικής ευαισθησίας των περιοχών αυτών. Σύμφωνα με το Πανεπιστήμιο

Αιγαίου, οι παράκτιες ζώνες αποτελούν περιοχές έντονου ανταγωνισμού χρήσεων, καθώς συγκεντρώνουν δραστηριότητες όπως ο τουρισμός, η αλιεία, η ναυσιπλοΐα και οι υδατοκαλλιέργειες (Πανεπιστήμιο Αιγαίου [Διάλεξη]). Παράλληλα, οι περιοχές αυτές επηρεάζονται τόσο από χερσαίες όσο και από θαλάσσιες διεργασίες, γεγονός που τις καθιστά ιδιαίτερα ευάλωτες σε περιβαλλοντικές πιέσεις .

Στο πλαίσιο αυτό, οι υδατοκαλλιέργειες αποτελούν δραστηριότητα με ιδιαίτερη χωρική και περιβαλλοντική σημασία. Η συνεχής αύξηση της ζήτησης για αλιευτικά προϊόντα, σε συνδυασμό με τη μείωση των φυσικών ιχθυαποθεμάτων, οδήγησε στη ραγδαία ανάπτυξη των υδατοκαλλιεργειών σε παγκόσμιο επίπεδο (FAO, 2024). Οι υδατοκαλλιέργειες αποτελούν πλέον έναν από τους ταχύτερα αναπτυσσόμενους τομείς παραγωγής τροφίμων διεθνώς και συμβάλλουν σημαντικά στην επισιτιστική ασφάλεια και στην οικονομική ανάπτυξη πολλών παράκτιων περιοχών. (Πανεπιστήμιο Αιγαίου [Διάλεξη]). Ωστόσο, η ανάπτυξη των υδατοκαλλιεργειών συνοδεύεται από σημαντικές περιβαλλοντικές προκλήσεις. Οι κυριότερες επιπτώσεις περιλαμβάνουν τον ευτροφισμό, την οργανική επιβάρυνση του θαλάσσιου πυθμένα, τη μεταβολή της ποιότητας των υδάτων, την κατανάλωση φυσικών πόρων και την αλληλεπίδραση με άγριους πληθυσμούς οργανισμών (Pillay & Kutty, 2005). Επιπλέον, η ακατάλληλη χωροθέτηση μονάδων μπορεί να οδηγήσει σε συγκρούσεις με άλλες χρήσεις του θαλάσσιου χώρου και σε υποβάθμιση ευαίσθητων οικοσυστημάτων.Για τον λόγο αυτό, η βιώσιμη ανάπτυξη των υδατοκαλλιεργειών προϋποθέτει την εφαρμογή ολοκληρωμένου χωρικού σχεδιασμού και περιβαλλοντικής διαχείρισης. Η χωροθέτηση των μονάδων πρέπει να λαμβάνει υπόψη τη φέρουσα ικανότητα των οικοσυστημάτων, την ποιότητα των υδάτων, την παρουσία προστατευόμενων περιοχών, τις κοινωνικοοικονομικές δραστηριότητες και τις πιθανές αλληλεπιδράσεις με άλλες χρήσεις του θαλάσσιου χώρου (European Parliament & Council of the European Union, 2014).

Στην Ελλάδα, η ανάπτυξη των υδατοκαλλιεργειών έχει ιδιαίτερη οικονομική σημασία, καθώς η χώρα αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους παραγωγούς μεσογειακών ειδών υδατοκαλλιέργειας στην Ευρωπαϊκή Ένωση, κυρίως τσιπούρας (*Sparus aurata*) και λαβρακιού (*Dicentrarchus labrax*). Η γεωμορφολογία της ελληνικής ακτογραμμής, η παρουσία μεγάλου αριθμού νησιών και οι ευνοϊκές περιβαλλοντικές συνθήκες συνέβαλαν σημαντικά στην ανάπτυξη του τομέα. Παράλληλα όμως, η έντονη

συγκέντρωση μονάδων σε ορισμένες περιοχές κατέστησε αναγκαία τη θέσπιση ειδικού χωροταξικού πλαισίου για τη ρύθμιση και οργάνωση του κλάδου.

Η ανάγκη αυτή οδήγησε στη δημιουργία του Ειδικού Πλαισίου Χωροταξικού Σχεδιασμού και Αειφόρου Ανάπτυξης για τις Υδατοκαλλιέργειες, το οποίο εγκρίθηκε με την Κοινή Υπουργική Απόφαση 31722/2011 (ΦΕΚ Β΄ 2505/2011) . Το Ειδικό Πλαίσιο καθορίζει τις βασικές κατευθύνσεις χωρικής οργάνωσης του τομέα, τις προϋποθέσεις χωροθέτησης μονάδων και τις περιοχές ανάπτυξης υδατοκαλλιεργειών, με στόχο τη διασφάλιση της βιώσιμης ανάπτυξης του κλάδου και την προστασία του περιβάλλοντος.

Συνεπώς, ο χωρικός σχεδιασμός και η βιώσιμη ανάπτυξη αποτελούν άρρηκτα συνδεδεμένες έννοιες και στον τομέα των υδατοκαλλιεργειών. Η αποτελεσματική οργάνωση του θαλάσσιου χώρου και η εφαρμογή περιβαλλοντικών κριτηρίων στη χωροθέτηση και λειτουργία των μονάδων αποτελούν βασικές προϋποθέσεις για τη διατήρηση της παραγωγικής δραστηριότητας χωρίς υποβάθμιση των θαλάσσιων οικοσυστημάτων.

Η αξιολόγηση της βιωσιμότητας μπορεί να αξιοποιηθεί και ως ουσιαστικό εργαλείο υποστήριξης αποφάσεων στον χωρικό σχεδιασμό των μονάδων υδατοκαλλιέργειας. Μέσω της συνεκτίμησης περιβαλλοντικών, οικονομικών και κοινωνικών παραμέτρων, καθώς και δεδομένων που σχετίζονται με τη φέρουσα ικανότητα, την ποιότητα των υδάτων, τις αποστάσεις από ευαίσθητα οικοσυστήματα και τη συμβατότητα με άλλες χρήσεις του παράκτιου και θαλάσσιου χώρου, μπορεί να ενισχυθεί η τεκμηρίωση της καταλληλότητας μιας θέσης εγκατάστασης. Με τον τρόπο αυτό, η αξιολόγηση δεν περιορίζεται στην αποτίμηση των επιπτώσεων μιας ήδη λειτουργούσας μονάδας, αλλά μπορεί να λειτουργήσει προληπτικά, συμβάλλοντας στην επιλογή περιοχών όπου η παραγωγική δραστηριότητα είναι δυνατόν να αναπτυχθεί με μικρότερες περιβαλλοντικές πιέσεις, καλύτερη κοινωνική αποδοχή και μεγαλύτερη μακροχρόνια βιωσιμότητα.

1.2. Θεσμικό πλαίσιο σε ευρωπαϊκό επίπεδο

Η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει διαμορφώσει ένα εκτεταμένο θεσμικό και κανονιστικό πλαίσιο για τη διαχείριση του θαλάσσιου χώρου, την προστασία του περιβάλλοντος και τη βιώσιμη ανάπτυξη των υδατοκαλλιεργειών. Το πλαίσιο αυτό βασίζεται στις αρχές της αειφόρου ανάπτυξης, της πρόληψης, της προφύλαξης και της ολοκληρωμένης διαχείρισης των φυσικών πόρων, επηρεάζοντας άμεσα τη χωροθέτηση, λειτουργία και περιβαλλοντική διαχείριση των μονάδων υδατοκαλλιέργειας στα κράτη μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης (European Union, 2012). Η έννοια της βιώσιμης ανάπτυξης ενσωματώθηκε θεσμικά στην ευρωπαϊκή πολιτική μέσω της Συνθήκης για την Ευρωπαϊκή Ένωση. Συγκεκριμένα, το άρθρο 3 της ΣΕΕ αναφέρει ότι η Ευρωπαϊκή Ένωση επιδιώκει «την αειφόρο ανάπτυξη της Ευρώπης με γνώμονα την ισόρροπη οικονομική ανάπτυξη και την προστασία και βελτίωση της ποιότητας του περιβάλλοντος» (European Union, 2012). Παράλληλα, το άρθρο 191 της Συνθήκης για τη Λειτουργία της Ευρωπαϊκής Ένωσης (ΣΛΕΕ) καθορίζει ότι η περιβαλλοντική πολιτική της Ένωσης βασίζεται στις αρχές της πρόληψης, της προφύλαξης και της αποκατάστασης της περιβαλλοντικής ζημίας στην πηγή της (European Union, 2012).

Η ανάγκη ολοκληρωμένης διαχείρισης των θαλάσσιων δραστηριοτήτων οδήγησε στη δημιουργία του θεσμού του Θαλάσσιου Χωροταξικού Σχεδιασμού (Marine Spatial Planning - MSP). Το βασικό νομοθετικό εργαλείο της Ευρωπαϊκής Ένωσης στον τομέα αυτό αποτελεί η Οδηγία 2014/89/ΕΕ για τη θέσπιση πλαισίου θαλάσσιου χωροταξικού σχεδιασμού (European Parliament & Council of the European Union, 2014). Σύμφωνα με το άρθρο 1 της Οδηγίας, στόχος του θαλάσσιου χωροταξικού σχεδιασμού είναι «η προώθηση της βιώσιμης ανάπτυξης των θαλάσσιων οικονομιών, της βιώσιμης ανάπτυξης των θαλάσσιων περιοχών και της βιώσιμης χρήσης των θαλάσσιων πόρων» (European Parliament & Council of the European Union, 2014).

Η Οδηγία 2014/89/ΕΕ εισάγει την οικοσυστημική προσέγγιση στη διαχείριση του θαλάσσιου χώρου, σύμφωνα με την οποία οι ανθρώπινες δραστηριότητες πρέπει να οργανώνονται εντός των οικολογικών ορίων των οικοσυστημάτων, διασφαλίζοντας τη διατήρηση της βιοποικιλότητας και της περιβαλλοντικής ισορροπίας (European Commission, 2021). Η προσέγγιση αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική για τις υδατοκαλλιέργειες, καθώς η δραστηριότητα εξαρτάται άμεσα από την ποιότητα του

θαλάσσιου περιβάλλοντος και μπορεί να προκαλέσει πιέσεις στα οικοσυστήματα όταν δεν εφαρμόζεται ορθός χωροταξικός σχεδιασμός.

Παράλληλα, η Οδηγία-Πλαίσιο για τα Ύδατα 2000/60/ΕΚ αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους πυλώνες της ευρωπαϊκής περιβαλλοντικής πολιτικής. Η Οδηγία θεσπίζει πλαίσιο κοινοτικής δράσης για την προστασία και διαχείριση όλων των επιφανειακών, μεταβατικών, παράκτιων και υπόγειων υδάτων, με στόχο την επίτευξη «καλής οικολογικής κατάστασης» των υδάτων (European Parliament & Council of the European Union, 2000). Η σημασία της Οδηγίας για τις υδατοκαλλιέργειες είναι ιδιαίτερα μεγάλη, καθώς η ποιότητα των υδάτων επηρεάζει άμεσα τόσο την παραγωγικότητα των μονάδων όσο και την περιβαλλοντική βιωσιμότητά τους.

Συμπληρωματικά, η Οδηγία 2008/56/ΕΚ για τη Θαλάσσια Στρατηγική (Marine Strategy Framework Directive - -MSFD) θέτει ως βασικό στόχο την επίτευξη «καλής περιβαλλοντικής κατάστασης» των θαλάσσιων υδάτων της Ευρωπαϊκής Ένωσης (European Parliament & Council of the European Union, 2008). Η Οδηγία προβλέπει παρακολούθηση και αξιολόγηση ανθρωπογενών πιέσεων όπως ο ευτροφισμός, η οργανική ρύπανση και η απώλεια βιοποικιλότητας, φαινόμενα που συνδέονται άμεσα με τις δραστηριότητες υδατοκαλλιέργειας όταν δεν εφαρμόζονται κατάλληλα μέτρα περιβαλλοντικής διαχείρισης.

Η περιβαλλοντική προστασία ενισχύεται περαιτέρω μέσω της Οδηγίας 2011/92/ΕΕ για την εκτίμηση περιβαλλοντικών επιπτώσεων (Environmental Impact Assessment - EIA), καθώς και της τροποποιητικής Οδηγίας 2014/52/ΕΕ (European Parliament & Council of the European Union, 2011· European Parliament & Council of the European Union, 2014a). Σύμφωνα με το πλαίσιο αυτό, έργα και δραστηριότητες που ενδέχεται να προκαλέσουν σημαντικές επιπτώσεις στο περιβάλλον, συμπεριλαμβανομένων μονάδων υδατοκαλλιέργειας, υποχρεούνται να υποβάλλονται σε διαδικασία περιβαλλοντικής αξιολόγησης πριν από την αδειοδότησή τους.

Σημαντική διάσταση της ευρωπαϊκής πολιτικής αποτελεί επίσης η προστασία της βιοποικιλότητας μέσω του Δικτύου Natura 2000. Το Δίκτυο βασίζεται στην Οδηγία 92/43/ΕΟΚ για τους οικοτόπους και στην Οδηγία 2009/147/ΕΚ για τα άγρια πτηνά (European Council, 1992· European Parliament & Council of the European Union, 2009). Οι προστατευόμενες περιοχές Natura 2000 αποτελούν περιοχές ιδιαίτερης οικολογικής αξίας, στις οποίες οι ανθρώπινες δραστηριότητες υπόκεινται σε

αυστηρότερους περιβαλλοντικούς περιορισμούς. Η χωροθέτηση μονάδων υδατοκαλλιέργειας εντός ή πλησίον προστατευόμενων περιοχών απαιτεί ειδική οικολογική αξιολόγηση και τεκμηρίωση ότι δεν θα επηρεαστεί αρνητικά η ακεραιότητα των προστατευόμενων οικοσυστημάτων.

Η ανάπτυξη των υδατοκαλλιεργειών συνδέεται επίσης με την Κοινή Αλιευτική Πολιτική (Common Fisheries Policy - CFP) της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Ο Κανονισμός (ΕΕ) 1380/2013 αναγνωρίζει ότι οι υδατοκαλλιέργειες αποτελούν στρατηγικό τομέα για τη βιώσιμη παραγωγή τροφίμων και τη μείωση της πίεσης στα φυσικά ιχθυαποθέματα (European Parliament & Council of the European Union, 2013). Στο πλαίσιο αυτό, η Ευρωπαϊκή Ένωση προωθεί την ανάπτυξη ανταγωνιστικών και περιβαλλοντικά βιώσιμων υδατοκαλλιεργειών, δίνοντας έμφαση στην καινοτομία, στη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος και στην αποδοτική χρήση πόρων.

Σημαντικό ρόλο στη διαμόρφωση της σύγχρονης ευρωπαϊκής πολιτικής διαδραματίζει η Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία (European Green Deal), η οποία παρουσιάστηκε το 2019 και αποτελεί τη βασική στρατηγική της Ευρωπαϊκής Ένωσης για τη μετάβαση σε μια κλιματικά ουδέτερη οικονομία έως το 2050 (European Commission, 2019). Η στρατηγική αυτή επηρεάζει άμεσα τον τομέα των υδατοκαλλιεργειών μέσω της προώθησης της κυκλικής οικονομίας, της αποδοτικής χρήσης πόρων και της προστασίας της βιοποικιλότητας.

Η σύγχρονη ευρωπαϊκή πολιτική για τις υδατοκαλλιέργειες διαμορφώνεται ολοένα και περισσότερο υπό το πρίσμα της βιώσιμης ανάπτυξης, της κλιματικής ουδετερότητας και της προστασίας των φυσικών πόρων. Στο πλαίσιο αυτό, η Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία (European Green Deal), η Στρατηγική «Από το Αγρόκτημα στο Πιάτο» (Farm to Fork Strategy) και οι Στόχοι Βιώσιμης Ανάπτυξης των Ηνωμένων Εθνών (Sustainable Development Goals - SDGs) αποτελούν βασικούς άξονες πολιτικής που επηρεάζουν άμεσα τον χωρικό σχεδιασμό, την περιβαλλοντική διαχείριση και τη λειτουργία των υδατοκαλλιεργειών στην Ευρωπαϊκή Ένωση.

Η Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία παρουσιάστηκε από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή το 2019 και αποτελεί τη συνολική στρατηγική της Ευρωπαϊκής Ένωσης για τη μετάβαση σε μία κλιματικά ουδέτερη οικονομία έως το 2050 (European Commission, 2019). Η στρατηγική αυτή επιδιώκει τον μετασχηματισμό του ευρωπαϊκού παραγωγικού μοντέλου μέσω της μείωσης των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, της ενίσχυσης

της κυκλικής οικονομίας, της προστασίας της βιοποικιλότητας και της βιώσιμης χρήσης φυσικών πόρων.

Οι υδατοκαλλιέργειες εντάσσονται στον πυρήνα της Ευρωπαϊκής Πράσινης Συμφωνίας, καθώς αποτελούν μέρος της λεγόμενης «γαλάζιας οικονομίας» (blue economy), η οποία συνδέεται με τη βιώσιμη αξιοποίηση των θαλάσσιων πόρων (European Commission, 2019). Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή αναγνωρίζει ότι οι υδατοκαλλιέργειες μπορούν να συμβάλουν στην παραγωγή τροφίμων χαμηλότερου περιβαλλοντικού αποτυπώματος σε σύγκριση με άλλες μορφές ζωικής παραγωγής, εφόσον εφαρμόζονται βιώσιμες πρακτικές εκτροφής και ορθός χωρικός σχεδιασμός (European Commission, 2021).

Παράλληλα, η Πράσινη Συμφωνία συνδέεται άμεσα με την ανάγκη προστασίας των θαλάσσιων οικοσυστημάτων και περιορισμού της περιβαλλοντικής επιβάρυνσης. Οι υδατοκαλλιέργειες μπορούν να προκαλέσουν επιπτώσεις όπως ευτροφισμό, οργανική επιβάρυνση του πυθμένα και μεταβολή της ποιότητας των υδάτων όταν αναπτύσσονται χωρίς κατάλληλη χωροταξική οργάνωση και περιβαλλοντική παρακολούθηση (Pillay & Kutty, 2005). Για τον λόγο αυτό, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή δίνει ιδιαίτερη έμφαση στη χρήση εργαλείων θαλάσσιου χωροταξικού σχεδιασμού και στην εφαρμογή οικοσυστημικής προσέγγισης στη διαχείριση των υδατοκαλλιεργειών (European Commission, 2021).

Στο πλαίσιο της Ευρωπαϊκής Πράσινης Συμφωνίας εντάσσεται και η Στρατηγική «Από το Αγρόκτημα στο Πιάτο» (Farm to Fork Strategy), η οποία δημοσιεύθηκε το 2020 και αποτελεί τον βασικό άξονα της Ευρωπαϊκής Ένωσης για τη δημιουργία βιώσιμων συστημάτων τροφίμων (European Commission, 2020). Η στρατηγική αυτή στοχεύει στη μετάβαση προς ένα σύστημα παραγωγής τροφίμων το οποίο θα είναι:

- περιβαλλοντικά βιώσιμο,
- οικονομικά ανθεκτικό,
- κοινωνικά δίκαιο,
- και ασφαλές για τον καταναλωτή.

Η στρατηγική «Από το Αγρόκτημα στο Πιάτο» συνδέεται άμεσα με τις υδατοκαλλιέργειες, καθώς προωθεί τη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος της

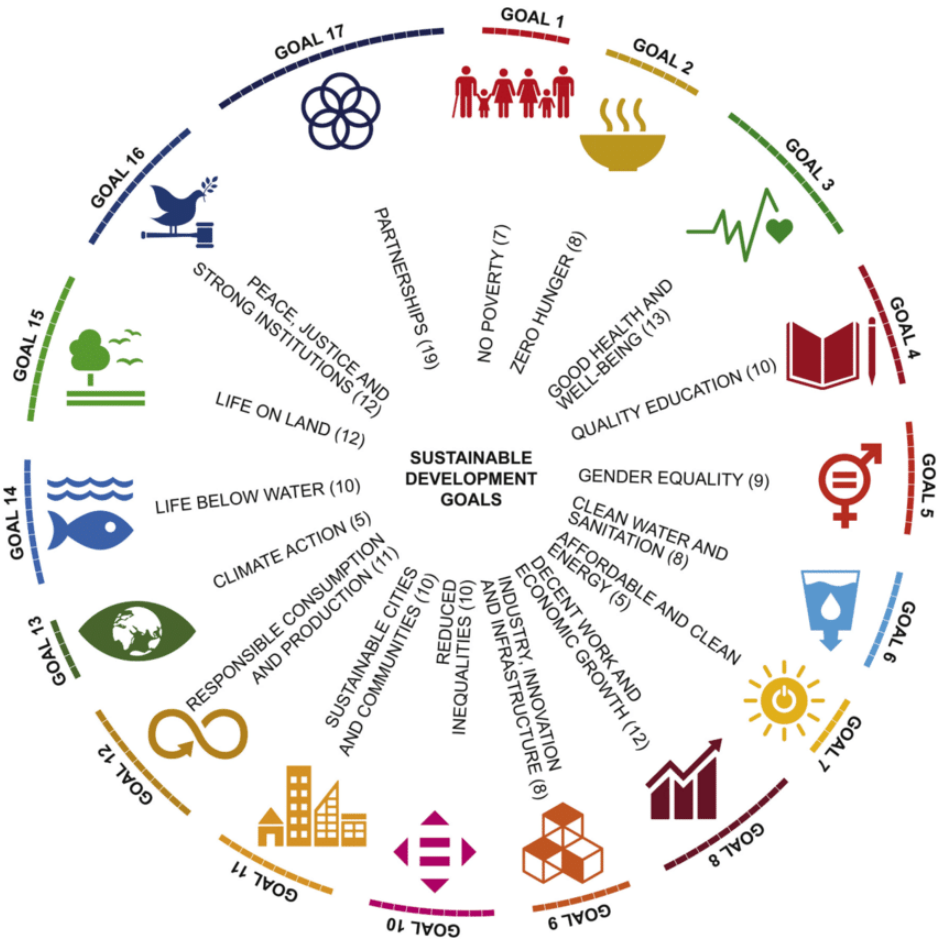
παραγωγής τροφίμων, τη βιώσιμη χρήση φυσικών πόρων και τη βελτίωση της αποδοτικότητας των συστημάτων παραγωγής (European Commission, 2020), και γι αυτό θα αναλυθεί σε βάθος σε επόμενο κεφάλαιο. Στις υδατοκαλλιέργειες, οι στόχοι αυτοί μεταφράζονται σε:

- μείωση της κατανάλωσης νερού και ενέργειας,
- περιορισμό της οργανικής ρύπανσης,
- βελτίωση της διαχείρισης αποβλήτων,
- μείωση της χρήσης αντιβιοτικών,
- και εφαρμογή πρακτικών κυκλικής οικονομίας.

Επιπλέον, η στρατηγική ενθαρρύνει τη χρήση βιώσιμων ιχθυοτροφών και την ανάπτυξη καινοτόμων τεχνολογιών, όπως τα κλειστά συστήματα ανακυκλοφορίας νερού (Recirculating Aquaculture Systems - RAS), τα οποία μειώνουν σημαντικά την κατανάλωση νερού και τον κίνδυνο περιβαλλοντικής επιβάρυνσης (European Commission, 2020).

Η ανάγκη βιώσιμης ανάπτυξης των υδατοκαλλιεργειών συνδέεται επίσης με τη Στρατηγική της Ευρωπαϊκής Ένωσης για τη Βιοποικιλότητα έως το 2030, η οποία αποτελεί βασικό πυλώνα της Πράσινης Συμφωνίας. Η στρατηγική αυτή επιδιώκει την προστασία των θαλάσσιων οικοσυστημάτων και την αποκατάσταση υποβαθμισμένων περιοχών, προωθώντας την προστασία τουλάχιστον του 30% των θαλάσσιων περιοχών της Ευρωπαϊκής Ένωσης (European Commission, 2020a). Ως αποτέλεσμα, η χωροθέτηση νέων μονάδων υδατοκαλλιέργειας απαιτεί πλέον μεγαλύτερη προσοχή όσον αφορά την αλληλεπίδραση με προστατευόμενες περιοχές και οικολογικά ευαίσθητα οικοσυστήματα.

Παράλληλα, οι ευρωπαϊκές πολιτικές συνδέονται άμεσα με τους Στόχους Βιώσιμης Ανάπτυξης (Sustainable Development Goals - SDGs) που υιοθετήθηκαν από τα Ηνωμένα Έθνη το 2015 στο πλαίσιο της Agenda 2030 (United Nations, 2015). Οι 17 Στόχοι Βιώσιμης Ανάπτυξης αποτελούν παγκόσμιο πλαίσιο δράσης για την αντιμετώπιση περιβαλλοντικών, κοινωνικών και οικονομικών προκλήσεων, όπως φαίνονται στην εικόνα 1.



***Εικόνα 1**: Οι 17 Στόχοι Βιώσιμης Ανάπτυξης των Ηνωμένων Εθνών (Carr et al. (2021))*

Οι υδατοκαλλιέργειες συνδέονται ιδιαίτερα με

- τον Στόχο 2 «Μηδενική Πείνα» (Zero Hunger),
- τον Στόχο 12 «Υπεύθυνη Κατανάλωση και Παραγωγή»,
- τον Στόχο 13 «Δράση για το Κλίμα»,
- και τον Στόχο 14 «Ζωή στο Νερό» (Life Below Water).

Οι υδατοκαλλιέργειες συνδέονται ιδιαίτερα με τον Στόχο 2 «Μηδενική Πείνα» (Zero Hunger), ο οποίος αφορά την επισιτιστική ασφάλεια και τη βιώσιμη παραγωγή τροφίμων. Η αυξανόμενη παγκόσμια ζήτηση για αλιευτικά προϊόντα και η υπερεκμετάλλευση πολλών φυσικών ιχθυαποθεμάτων καθιστούν τις υδατοκαλλιέργειες σημαντικό εργαλείο για την κάλυψη διατροφικών αναγκών χωρίς περαιτέρω επιβάρυνση των φυσικών πληθυσμών (FAO, 2024).

Ιδιαίτερη σημασία έχει επίσης ο Στόχος 12 «Υπεύθυνη Κατανάλωση και Παραγωγή», ο οποίος προωθεί τη βιώσιμη χρήση φυσικών πόρων, τη μείωση αποβλήτων και την εφαρμογή αρχών κυκλικής οικονομίας (United Nations, 2015). Οι αρχές αυτές συνδέονται άμεσα με τη σύγχρονη προσέγγιση βιώσιμης διαχείρισης των υδατοκαλλιεργειών, η οποία περιλαμβάνει αξιοποίηση παραπροϊόντων, ενεργειακή αποδοτικότητα και περιορισμό περιβαλλοντικών επιπτώσεων.

Εξίσου σημαντικός είναι ο Στόχος 13 «Δράση για το Κλίμα», καθώς οι υδατοκαλλιέργειες καλούνται να προσαρμοστούν στις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής, όπως η αύξηση της θερμοκρασίας των υδάτων, οι μεταβολές στην αλατότητα και τα ακραία καιρικά φαινόμενα. Η εφαρμογή βιώσιμων τεχνολογιών και η βελτίωση της ανθεκτικότητας των παραγωγικών συστημάτων αποτελούν βασικές προϋποθέσεις για τη μακροχρόνια βιωσιμότητα του τομέα.

Ο σημαντικότερος ίσως στόχος για τις υδατοκαλλιέργειες είναι ο Στόχος 14 «Ζωή στο Νερό» (Life Below Water), ο οποίος αφορά τη διατήρηση και βιώσιμη χρήση των ωκεανών, των θαλασσών και των θαλάσσιων πόρων (United Nations, 2015). Ο στόχος αυτός προωθεί τη μείωση της θαλάσσιας ρύπανσης, την προστασία των θαλάσσιων οικοσυστημάτων και τη βιώσιμη διαχείριση των θαλάσσιων πόρων, στοιχεία που συνδέονται άμεσα με τον χωροταξικό σχεδιασμό και την περιβαλλοντική διαχείριση των υδατοκαλλιεργειών.

Η σύνδεση των ευρωπαϊκών πολιτικών με τους SDGs αποτυπώνει τη μετάβαση από ένα μοντέλο αποκλειστικά παραγωγικής ανάπτυξης σε ένα ολοκληρωμένο μοντέλο βιώσιμης διαχείρισης φυσικών πόρων. Στο πλαίσιο αυτό, ο χωρικός σχεδιασμός αποκτά καθοριστικό ρόλο, καθώς λειτουργεί ως μηχανισμός εφαρμογής των αρχών της βιωσιμότητας στον θαλάσσιο χώρο.

1.2.1. Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία, Στρατηγική «Από το Αγρόκτημα στο Πιάτο» και Στόχοι Βιώσιμης Ανάπτυξης του ΟΗΕ σε σύνδεση με τον χωρικό σχεδιασμό και τις υδατοκαλλιέργειες

Η διαμόρφωση της σύγχρονης ευρωπαϊκής πολιτικής για τις υδατοκαλλιέργειες συνδέεται άμεσα με τη γενικότερη στρατηγική μετάβασης της Ευρωπαϊκής Ένωσης προς ένα μοντέλο βιώσιμης ανάπτυξης, κλιματικής ουδετερότητας και ορθολογικής

διαχείρισης φυσικών πόρων. Η Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία (European Green Deal), η Στρατηγική «Από το Αγρόκτημα στο Πιάτο» (Farm to Fork Strategy) και οι Στόχοι Βιώσιμης Ανάπτυξης των Ηνωμένων Εθνών αποτελούν αλληλένδετα πλαίσια πολιτικής, τα οποία επηρεάζουν άμεσα τόσο τη χωροταξική οργάνωση όσο και τη λειτουργία του τομέα των υδατοκαλλιεργειών. Οι πολιτικές αυτές δεν περιορίζονται αποκλειστικά στην προστασία του περιβάλλοντος, αλλά επιδιώκουν τη συνολική αναδιάρθρωση των παραγωγικών συστημάτων, ώστε η οικονομική ανάπτυξη να συμβαδίζει με τη διατήρηση της οικολογικής ισορροπίας και τη βιώσιμη χρήση φυσικών πόρων.

Η στρατηγική «Από το Αγρόκτημα στο Πιάτο» (Farm to Fork Strategy), η οποία δημοσιεύθηκε το 2020, αποτελεί έναν από τους βασικούς άξονες της Ευρωπαϊκής Πράσινης Συμφωνίας και στοχεύει στη δημιουργία βιώσιμων συστημάτων παραγωγής τροφίμων (European Commission, 2020). Σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή Επιτροπή, η παραγωγή τροφίμων στην Ευρωπαϊκή Ένωση πρέπει να μετασχηματιστεί ώστε να μειωθεί το περιβαλλοντικό αποτύπωμα, να προστατευθεί η βιοποικιλότητα και να διασφαλιστεί η ανθεκτικότητα των συστημάτων τροφίμων απέναντι στην κλιματική αλλαγή και στις μελλοντικές περιβαλλοντικές πιέσεις (European Commission, 2020).

Οι υδατοκαλλιέργειες αποτελούν σημαντικό μέρος αυτής της στρατηγικής, καθώς θεωρούνται παραγωγικός τομέας με δυνατότητα συμβολής στην παροχή βιώσιμων πρωτεϊνών και στη μείωση της πίεσης στα φυσικά ιχθυαποθέματα. Ωστόσο, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή επισημαίνει ότι η περαιτέρω ανάπτυξη του κλάδου πρέπει να βασίζεται στη βιωσιμότητα, στην κυκλική οικονομία και στην περιβαλλοντική προστασία (European Commission, 2021). Για τον λόγο αυτό, η στρατηγική «Από το Αγρόκτημα στο Πιάτο» προωθεί τη μείωση της κατανάλωσης πόρων, τον περιορισμό των αποβλήτων, τη βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας και τη χρήση καινοτόμων τεχνολογιών στις υδατοκαλλιέργειες.

Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στη χρήση συστημάτων ανακυκλοφορίας νερού (Recirculating Aquaculture Systems - RAS), στη βελτίωση της διαχείρισης αποβλήτων και στην ανάπτυξη βιώσιμων ιχθυοτροφών. Τα συστήματα αυτά επιτρέπουν σημαντική μείωση της κατανάλωσης νερού και περιορισμό της περιβαλλοντικής επιβάρυνσης, συμβάλλοντας στην εφαρμογή αρχών κυκλικής οικονομίας στον τομέα των υδατοκαλλιεργειών (European Commission, 2021). Παράλληλα, η στρατηγική

προωθεί τη μείωση της χρήσης αντιβιοτικών και χημικών ουσιών, καθώς και τη βελτίωση της ιχνηλασιμότητας και ασφάλειας των προϊόντων.

Η προστασία της βιοποικιλότητας αποτελεί επίσης βασικό στοιχείο της ευρωπαϊκής πολιτικής. Η Στρατηγική της Ευρωπαϊκής Ένωσης για τη Βιοποικιλότητα έως το 2030 στοχεύει στην προστασία των θαλάσσιων οικοσυστημάτων και στην αποκατάσταση υποβαθμισμένων περιοχών, προωθώντας την προστασία τουλάχιστον του 30% των θαλάσσιων περιοχών της Ευρωπαϊκής Ένωσης (European Commission, 2020a). Η πολιτική αυτή επηρεάζει άμεσα τον χωρικό σχεδιασμό των υδατοκαλλιεργειών, καθώς η εγκατάσταση νέων μονάδων σε περιοχές οικολογικής σημασίας απαιτεί αυστηρή περιβαλλοντική αξιολόγηση και ειδική τεκμηρίωση ότι δεν θα επηρεαστεί η ακεραιότητα των προστατευόμενων οικοσυστημάτων.

Παράλληλα με τις ευρωπαϊκές πολιτικές, ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο διαδραματίζουν και οι Στόχοι Βιώσιμης Ανάπτυξης των Ηνωμένων Εθνών (Sustainable Development Goals - SDGs), οι οποίοι υιοθετήθηκαν το 2015 στο πλαίσιο της Agenda 2030 (United Nations, 2015). Οι Στόχοι Βιώσιμης Ανάπτυξης αποτελούν παγκόσμιο πλαίσιο δράσης για την αντιμετώπιση κοινωνικών, οικονομικών και περιβαλλοντικών προκλήσεων και επηρεάζουν άμεσα τις ευρωπαϊκές πολιτικές για τη βιώσιμη ανάπτυξη.

Συνεπώς, η Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία, η Στρατηγική «Από το Αγρόκτημα στο Πιάτο» και οι Στόχοι Βιώσιμης Ανάπτυξης των Ηνωμένων Εθνών συγκροτούν ένα ενιαίο πλαίσιο πολιτικής που επηρεάζει καθοριστικά τη σύγχρονη ανάπτυξη των υδατοκαλλιεργειών. Το πλαίσιο αυτό μετατοπίζει το επίκεντρο από την αποκλειστικά παραγωγική ανάπτυξη προς ένα μοντέλο ολοκληρωμένης βιώσιμης διαχείρισης, στο οποίο ο χωρικός σχεδιασμός, η περιβαλλοντική προστασία, η κυκλική οικονομία και η προστασία των θαλάσσιων οικοσυστημάτων αποτελούν βασικές προϋποθέσεις για τη μακροχρόνια βιωσιμότητα του κλάδου.

Σύνδεση Ευρωπαϊκού και Εθνικού Θεσμικού Πλαισίου

Ο χωρικός σχεδιασμός αποτελεί βασικό εργαλείο οργάνωσης των ανθρώπινων δραστηριοτήτων στον χώρο, με στόχο την ισορροπημένη ανάπτυξη, την αποφυγή συγκρούσεων χρήσεων γης και θάλασσας, και την προστασία των φυσικών πόρων. Στο πλαίσιο της βιώσιμης ανάπτυξης, ο χωρικός σχεδιασμός δεν περιορίζεται στη χωροθέτηση παραγωγικών δραστηριοτήτων, αλλά λειτουργεί ως μηχανισμός συντονισμού μεταξύ οικονομικών, κοινωνικών και περιβαλλοντικών στόχων. Η έννοια

της βιώσιμης ανάπτυξης, όπως καθιερώθηκε από την Έκθεση Brundtland, αναφέρεται στην ανάπτυξη που καλύπτει τις ανάγκες του παρόντος χωρίς να υπονομεύει τη δυνατότητα των μελλοντικών γενεών να καλύψουν τις δικές τους ανάγκες (World Commission on Environment and Development, 1987).

Η σύνδεση χωροταξίας και βιωσιμότητας είναι ιδιαίτερα κρίσιμη στις παράκτιες και θαλάσσιες ζώνες, όπου συνυπάρχουν πολλαπλές δραστηριότητες, όπως ο τουρισμός, η ναυσιπλοΐα, η αλιεία, η αναψυχή, οι λιμενικές εγκαταστάσεις και οι υδατοκαλλιέργειες. Η παράκτια θαλάσσια ζώνη χαρακτηρίζεται ως περιοχή έντονου ανταγωνισμού για χώρο, καθώς συγκεντρώνει σημαντικό μέρος των ανθρωπογενών δραστηριοτήτων και επηρεάζεται τόσο από τις χερσαίες λεκάνες απορροής όσο και από τις θαλάσσιες διεργασίες ανανέωσης, διάχυσης και μεταφοράς ρύπων . Επομένως, η χωροταξική οργάνωση αποτελεί προϋπόθεση για τη μείωση των συγκρούσεων, τη διατήρηση της περιβαλλοντικής ποιότητας και την ορθολογική αξιοποίηση των διαθέσιμων πόρων.

Στην περίπτωση των υδατοκαλλιεργειών, ο χωρικός σχεδιασμός αποκτά ιδιαίτερη σημασία, καθώς η δραστηριότητα συνδέεται άμεσα με την ποιότητα του θαλάσσιου περιβάλλοντος και με τη φέρουσα ικανότητα των οικοσυστημάτων. Οι υδατοκαλλιέργειες αποτελούν παραγωγική δραστηριότητα που εγκαθίσταται σε συγκεκριμένο θαλάσσιο ή παράκτιο χώρο και μπορεί να προκαλέσει περιβαλλοντικές επιδράσεις, η ένταση και αναστρεψιμότητα των οποίων εξαρτάται από τον τύπο της εκτροφής, το επίπεδο παραγωγής και τα φυσικοχημικά και βιολογικά χαρακτηριστικά της περιοχής. Για τον λόγο αυτό, η χωροθέτηση μονάδων δεν μπορεί να αντιμετωπίζεται μόνο ως διοικητική διαδικασία αδειοδότησης, αλλά ως μέρος μιας ολοκληρωμένης στρατηγικής βιώσιμης διαχείρισης του θαλάσσιου χώρου.

Σε ευρωπαϊκό επίπεδο, η ανάγκη ορθολογικής οργάνωσης των θαλάσσιων δραστηριοτήτων αποτυπώνεται στην Οδηγία 2014/89/ΕΕ για τον Θαλάσσιο Χωροταξικό Σχεδιασμό, η οποία επιδιώκει την προώθηση της βιώσιμης ανάπτυξης των θαλάσσιων οικονομιών, της βιώσιμης ανάπτυξης των θαλάσσιων περιοχών και της βιώσιμης χρήσης των θαλάσσιων πόρων. Η προσέγγιση αυτή συνδέεται με την οικοσυστημική διαχείριση και με την ανάγκη συνύπαρξης διαφορετικών χρήσεων στον θαλάσσιο χώρο. Παράλληλα, οι στρατηγικές κατευθύνσεις της Ευρωπαϊκής Ένωσης για την υδατοκαλλιέργεια 2021-2030 στοχεύουν σε έναν κλάδο πιο ανταγωνιστικό,

ανθεκτικό και περιβαλλοντικά βιώσιμο, αναγνωρίζοντας ότι η ανάπτυξη της παραγωγής πρέπει να συνοδεύεται από περιορισμό των περιβαλλοντικών πιέσεων.

Η σημασία της υδατοκαλλιέργειας ενισχύεται από τη διεθνή αύξηση της ζήτησης για υδρόβια τρόφιμα. Σύμφωνα με τον FAO, το 2022 η υδατοκαλλιέργεια ξεπέρασε για πρώτη φορά την αλιεία σύλληψης στην παραγωγή υδρόβιων ζώων, φτάνοντας τους 94,4 εκατ. τόνους και αντιπροσωπεύοντας περίπου το 51% της παγκόσμιας παραγωγής υδρόβιων ζώων. Η εξέλιξη αυτή δείχνει ότι ο κλάδος μπορεί να συμβάλει σημαντικά στην επισιτιστική ασφάλεια, υπό την προϋπόθεση ότι η ανάπτυξή του θα στηρίζεται σε τεκμηριωμένο χωροταξικό σχεδιασμό, περιβαλλοντική παρακολούθηση και βιώσιμες πρακτικές παραγωγής.

Συνολικά, το ευρωπαϊκό θεσμικό πλαίσιο για τις υδατοκαλλιέργειες βασίζεται στην ενσωμάτωση περιβαλλοντικών κριτηρίων στον χωρικό σχεδιασμό και στη διαχείριση των θαλάσσιων δραστηριοτήτων. Η προστασία των οικοσυστημάτων, η βιώσιμη χρήση φυσικών πόρων και η ορθολογική χωροθέτηση των μονάδων αποτελούν βασικές προϋποθέσεις για τη μακροχρόνια βιωσιμότητα του κλάδου στην Ευρωπαϊκή Ένωση.

1.3. Θεσμικό πλαίσιο σε εθνικό επίπεδο (Ελλάδα)

Η ανάπτυξη των υδατοκαλλιεργειών στην Ελλάδα συνδέθηκε από νωρίς με την ανάγκη δημιουργίας ειδικού θεσμικού πλαισίου χωροταξικής οργάνωσης και περιβαλλοντικής διαχείρισης. Η ταχεία ανάπτυξη του κλάδου από τη δεκαετία του 1980, ιδιαίτερα στις θαλάσσιες ιχθυοκαλλιέργειες τσιπούρας και λαβρακιού, οδήγησε στη συγκέντρωση μεγάλου αριθμού μονάδων σε παράκτιες περιοχές, δημιουργώντας πιέσεις στο περιβάλλον και συγκρούσεις με άλλες δραστηριότητες.

Το σημαντικότερο θεσμικό εργαλείο χωρικής οργάνωσης του τομέα αποτελεί το Ειδικό Πλαίσιο Χωροταξικού Σχεδιασμού και Αειφόρου Ανάπτυξης για τις Υδατοκαλλιέργειες, το οποίο εγκρίθηκε με την Κοινή Υπουργική Απόφαση 31722/2011 (ΦΕΚ Β΄ 2505/04.11.2011). Το Ειδικό Πλαίσιο καθορίζει τις βασικές κατευθύνσεις για τη χωροθέτηση και ανάπτυξη των υδατοκαλλιεργειών στον ελληνικό χώρο, λαμβάνοντας υπόψη περιβαλλοντικά, κοινωνικά και οικονομικά κριτήρια.

Σύμφωνα με το Ειδικό Πλαίσιο, βασικός στόχος είναι η προώθηση της οργανωμένης ανάπτυξης των υδατοκαλλιεργειών και η προστασία του περιβάλλοντος μέσω ολοκληρωμένης χωροταξικής διαχείρισης . Το πλαίσιο αυτό εισάγει τις Περιοχές Ανάπτυξης Υδατοκαλλιεργειών (ΠΑΥ) και τις Περιοχές Οργανωμένης Ανάπτυξης Υδατοκαλλιεργειών (ΠΟΑΥ), οι οποίες αποτελούν οργανωμένους χωρικούς υποδοχείς εγκατάστασης μονάδων.

Οι ΠΟΑΥ ορίζονται ως θαλάσσιες εκτάσεις οργανωμένης ανάπτυξης υδατοκαλλιεργειών, στις οποίες συγκεντρώνονται μονάδες με στόχο τη βελτίωση της διαχείρισης, την αποτελεσματικότερη περιβαλλοντική παρακολούθηση και την επίτευξη οικονομιών κλίμακας . Παράλληλα, το Ειδικό Πλαίσιο προβλέπει την αξιολόγηση της φέρουσας ικανότητας των περιοχών, δηλαδή της δυνατότητας ενός οικοσυστήματος να υποστηρίξει συγκεκριμένο επίπεδο δραστηριότητας χωρίς περιβαλλοντική υποβάθμιση .

Η προστασία των υδάτων στην Ελλάδα ρυθμίζεται μέσω του Νόμου 3199/2003, με τον οποίο ενσωματώθηκε η Οδηγία 2000/60/ΕΚ για τα ύδατα. Ο νόμος αυτός προβλέπει την προστασία και ολοκληρωμένη διαχείριση των υδάτινων πόρων και αποτελεί βασικό εργαλείο περιβαλλοντικής πολιτικής για τις υδατοκαλλιέργειες.

Παράλληλα, η περιβαλλοντική αδειοδότηση των μονάδων ρυθμίζεται από τον Νόμο 4014/2011 για την περιβαλλοντική αδειοδότηση έργων και δραστηριοτήτων. Ο νόμος αυτός καθορίζει τις διαδικασίες έγκρισης περιβαλλοντικών όρων και τις απαιτήσεις εκτίμησης περιβαλλοντικών επιπτώσεων για έργα υδατοκαλλιέργειας.

Η εθνική πολιτική για τις υδατοκαλλιέργειες επηρεάζεται επίσης από το Δίκτυο Natura 2000, καθώς πολλές περιοχές ανάπτυξης μονάδων βρίσκονται κοντά σε προστατευόμενα οικοσυστήματα. Ως αποτέλεσμα, απαιτείται ειδική περιβαλλοντική αξιολόγηση για την εγκατάσταση δραστηριοτήτων εντός ή πλησίον προστατευόμενων περιοχών.

Συνολικά, το ελληνικό θεσμικό πλαίσιο επιδιώκει τη συνδυασμένη προστασία του περιβάλλοντος και την ανάπτυξη του κλάδου μέσω οργανωμένης χωροθέτησης, περιβαλλοντικής παρακολούθησης και εφαρμογής των αρχών της βιώσιμης ανάπτυξης.

Στην Ελλάδα, η ανάγκη χωρικής οργάνωσης των υδατοκαλλιεργειών θεσμοθετήθηκε με το Ειδικό Πλαίσιο Χωροταξικού Σχεδιασμού και Αειφόρου Ανάπτυξης για τις

Υδατοκαλλιέργειες. Σκοπός του Ειδικού Πλαισίου είναι η παροχή κατευθύνσεων, κανόνων και κριτηρίων για τη χωρική διάρθρωση, οργάνωση και ανάπτυξη του κλάδου στον ελληνικό χώρο, με στόχο τόσο την προστασία του περιβάλλοντος όσο και τη διασφάλιση της ανταγωνιστικότητας του κλάδου . Το ίδιο θεσμικό πλαίσιο συνδέεται με την έννοια των Περιοχών Οργανωμένης Ανάπτυξης Υδατοκαλλιεργειών, δηλαδή οργανωμένων χωρικών υποδοχέων που επιδιώκουν να περιορίσουν την άναρχη χωροθέτηση και να ενισχύσουν τον έλεγχο, την περιβαλλοντική διαχείριση και τη συμβατότητα με άλλες χρήσεις του θαλάσσιου και παράκτιου χώρου .

Συνεπώς, η βιωσιμότητα των υδατοκαλλιεργειών δεν εξαρτάται μόνο από την τεχνολογική βελτίωση των μονάδων ή τη μείωση των εκπομπών και αποβλήτων, αλλά και από το πού και πώς εγκαθίστανται. Ο χωρικός σχεδιασμός λειτουργεί ως προληπτικό εργαλείο περιβαλλοντικής προστασίας, καθώς επιτρέπει την επιλογή κατάλληλων περιοχών, την αποφυγή ευαίσθητων οικοσυστημάτων, την εκτίμηση της φέρουσας ικανότητας και τη διαχείριση των συγκρούσεων με άλλες δραστηριότητες. Με αυτόν τον τρόπο, η χωροταξία αποτελεί βασικό πυλώνα της βιώσιμης υδατοκαλλιέργειας, συνδέοντας την παραγωγική ανάπτυξη με την προστασία του θαλάσσιου περιβάλλοντος και τη μακροχρόνια κοινωνικοοικονομική ανθεκτικότητα των παράκτιων περιοχών.

1.4. Εθνικό επίπεδο: Θεσμική εξέλιξη, χωροταξικά εργαλεία και εφαρμογή στην Ελλάδα

Η ελληνική πολιτική για τη χωρική οργάνωση των υδατοκαλλιεργειών διαμορφώθηκε μέσα από μια σταδιακή μετάβαση από ένα καθεστώς επιμέρους αδειοδοτήσεων και σημειακών χωροθετήσεων προς ένα πιο συστηματικό μοντέλο τομεακού χωροταξικού σχεδιασμού. Η εξέλιξη αυτή δεν υπήρξε μόνο αποτέλεσμα της οικονομικής ανάπτυξης του κλάδου, αλλά και συνέπεια των πιέσεων που δημιουργήθηκαν από την άναρχη εγκατάσταση μονάδων, τις συγκρούσεις με άλλες παράκτιες δραστηριότητες και την ανάγκη εναρμόνισης με το ευρωπαϊκό περιβαλλοντικό κεκτημένο. Ήδη στο Ειδικό Πλαίσιο του 2011 αποτυπώνεται ότι το καθεστώς αδειοδότησης των μονάδων υδατοκαλλιέργειας στηριζόταν σε διάσπαρτες νομοθετικές διατάξεις, μεταξύ των

οποίων ο Ν. 1650/1986 για την προστασία του περιβάλλοντος, ο Ν. 3199/2003 για την προστασία και διαχείριση των υδάτων, η ΚΥΑ 69269/5387/1990 για τις Μελέτες Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων και ειδικές αποφάσεις για τη ρύθμιση της αδειοδότησης μονάδων θαλάσσιας ιχθυοκαλλιέργειας (ΦΕΚ 2505/Β/2011). Η πολυδιάσπαση αυτή εξηγεί γιατί η ανάγκη ενός ειδικού χωροταξικού πλαισίου δεν ήταν απλώς τεχνική επιλογή, αλλά θεσμική αναγκαιότητα.

Η πρώτη ουσιαστική βάση για τον χωροταξικό σχεδιασμό στην Ελλάδα τέθηκε με τον Ν. 2742/1999 «Χωροταξικός σχεδιασμός και αειφόρος ανάπτυξη», ο οποίος εισήγαγε τα ειδικά πλαίσια χωροταξικού σχεδιασμού για δραστηριότητες εθνικής σημασίας και προέβλεψε τη δυνατότητα δημιουργίας οργανωμένων περιοχών ανάπτυξης παραγωγικών δραστηριοτήτων. Στο ίδιο θεσμικό περιβάλλον εντάχθηκε και η Υπουργική Απόφαση Η.Π. 17239/2002, η οποία καθόρισε δικαιολογητικά, διαδικασία και προϋποθέσεις χωροθέτησης Περιοχών Οργανωμένης Ανάπτυξης Υδατοκαλλιεργειών, δηλαδή των ΠΟΑΥ (ΦΕΚ 2505/Β/2011) . Η σημασία αυτής της περιόδου είναι ότι η υδατοκαλλιέργεια αρχίζει να αντιμετωπίζεται όχι ως μεμονωμένη δραστηριότητα εκμίσθωσης θαλάσσιου χώρου, αλλά ως παραγωγικός τομέας που απαιτεί οργανωμένους χωρικούς υποδοχείς, κοινές υποδομές, περιβαλλοντική παρακολούθηση και διαχείριση σωρευτικών επιπτώσεων.

Η θεσμική ωρίμανση του τομέα κορυφώθηκε με την ΚΥΑ 31722/2011, με την οποία εγκρίθηκε το «Ειδικό Πλαίσιο Χωροταξικού Σχεδιασμού και Αειφόρου Ανάπτυξης για τις Υδατοκαλλιέργειες» μαζί με τη Στρατηγική Μελέτη Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων αυτού. Το άρθρο 1 του Πλαισίου προσδιορίζει ως σκοπό του την παροχή κατευθύνσεων, κανόνων και κριτηρίων για τη χωρική διάρθρωση, οργάνωση και ανάπτυξη του κλάδου στον ελληνικό χώρο, καθώς και των αναγκαίων υποδομών, με στόχο την προστασία του περιβάλλοντος και τη διατήρηση της ανταγωνιστικότητας του τομέα . Το σημείο αυτό είναι κρίσιμο διότι δείχνει ότι η εθνική πολιτική δεν αποσκοπεί μόνο στον περιορισμό των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, αλλά και στη θεσμική σταθεροποίηση ενός παραγωγικού κλάδου με ισχυρή εξαγωγική και περιφερειακή σημασία. (ΦΕΚ 2505/Β/2011)

Η Στρατηγική Μελέτη Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων που συνόδευσε το Ειδικό Πλαίσιο έχει ιδιαίτερη αξία, επειδή δεν αξιολόγησε απλώς μια προτεινόμενη πολιτική, αλλά συνέκρινε διαφορετικά σενάρια χωρικής οργάνωσης. Το σενάριο μη παρέμβασης

αξιολογήθηκε αρνητικά, καθώς η υφιστάμενη κατάσταση θεωρήθηκε αντίθετη προς τον αναπτυξιακό στόχο του ΕΠΑΛ (Επιχειρησιακό Πρόγραμμα Αλιείας) 2007-2013 για αειφόρο ανάπτυξη της υδατοκαλλιέργειας, ενώ η υπάρχουσα χωρική οργάνωση κρίθηκε ότι έθετε σε επισφάλεια την ελληνική υδατοκαλλιέργεια και τα επενδεδυμένα δημόσια και ιδιωτικά κεφάλαια . Επιπλέον, η «μη οργάνωση» συνδέθηκε με αδυναμία αξιοποίησης των οικονομικών και κοινωνικών οφελών σε παραμεθόριες και απομακρυσμένες νησιωτικές περιοχές, καθώς και με αδυναμία ουσιαστικής ενσωμάτωσης της περιβαλλοντικής διάστασης στη χωρική οργάνωση του κλάδου (ΣΜΠΕ, 2011).

΄Οσον αφορά τη ΣΜΠΕ στη μη οργανωμένη χωροθέτηση είναι ιδιαίτερα σημαντική για την εργασία, επειδή δείχνει ότι το πρόβλημα δεν ήταν μόνο η ύπαρξη περιβαλλοντικών επιπτώσεων, αλλά ο τρόπος με τον οποίο αυτές δεν μπορούσαν να ελεγχθούν σε καθεστώς διάσπαρτων σημειακών αδειοδοτήσεων. Η μελέτη αναφέρει ότι η υφιστάμενη εγκατάσταση μονάδων βασιζόταν κυρίως σε σημειακές χωροθετήσεις, χωρίς ευρύτερη αξιολόγηση των παραμέτρων του οικοσυστήματος, ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις δεν είχαν ληφθεί υπόψη οι αναγκαίες χερσαίες υποστηρικτικές εγκαταστάσεις, γεγονός που οδηγούσε σε προβλήματα άτυπης ή αυθαίρετης ανάπτυξης συνοδών υποδομών. Αυτό συνδέει άμεσα τη χωροταξική πολιτική με την έννοια της φέρουσας ικανότητας, της ολοκληρωμένης παράκτιας διαχείρισης και της πρόληψης περιβαλλοντικών πιέσεων. (ΣΜΠΕ, 2011).

Στο εθνικό χωροταξικό μοντέλο που προωθήθηκε, βασική έννοια είναι οι Περιοχές Ανάπτυξης Υδατοκαλλιεργειών, δηλαδή οι ΠΑΥ. Οι ΠΑΥ αποτελούν ευρύτερες θαλάσσιες περιοχές που κρίνονται κατάλληλες για την ανάπτυξη υδατοκαλλιεργητικών δραστηριοτήτων. Εντός αυτών μπορούν να προσδιορίζονται ζώνες οργανωμένης ανάπτυξης με φορέα διαχείρισης, δηλαδή ΠΟΑΥ, αλλά και περιοχές άτυπης συγκέντρωσης μονάδων, δηλαδή ΠΑΣΜ. (Πανεπιστήμιο Αιγαίου [Διάλεξη]). Αυτή η διάκριση είναι ουσιαστική, διότι το Ειδικό Πλαίσιο δεν υιοθέτησε ένα απόλυτα συγκεντρωτικό μοντέλο, όπου όλες οι μονάδες θα έπρεπε να ενταχθούν άμεσα σε ΠΟΑΥ, αλλά ένα μικτό μοντέλο μεταβατικής οργάνωσης, το οποίο αναγνώριζε την προϋπάρχουσα γεωγραφική διασπορά του κλάδου.

Οι ΠΟΑΥ αποτελούν το πλέον οργανωμένο χωρικό εργαλείο του ελληνικού μοντέλου. Η λειτουργία τους συνδέεται με την ύπαρξη φορέα διαχείρισης, με οργανωμένη

παρακολούθηση, με δυνατότητα συγκέντρωσης μονάδων και με προοπτική καλύτερης διαχείρισης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Το Ειδικό Πλαίσιο περιλαμβάνει μάλιστα κατευθύνσεις για την τροποποίηση της ΥΑ 17239/2002, διευκρινίζοντας ότι ο φορέας διαχείρισης της ΠΟΑΥ δεν μισθώνει ο ίδιος τις θαλάσσιες εκτάσεις, αλλά αυτές εκμισθώνονται απευθείας στους υδατοκαλλιεργητές από τον εκπρόσωπο του Ελληνικού Δημοσίου· παράλληλα, όταν τμήματα της ΠΟΑΥ είναι ήδη μισθωμένα, απαιτείται συναίνεση παραγωγών που έχουν μισθώσει τουλάχιστον το 60% της έκτασης . Η ρύθμιση αυτή δείχνει τη διοικητική πολυπλοκότητα των ΠΟΑΥ, επειδή η οργανωμένη χωροθέτηση πρέπει να συνδυαστεί με ήδη υφιστάμενα δικαιώματα χρήσης, επενδύσεις και παραγωγικές δομές. (ΦΕΚ 2505/Β/2011)

Μετά το Ειδικό Πλαίσιο, σημαντικό σταθμό αποτέλεσε ο Ν. 4282/2014 «Ανάπτυξη Υδατοκαλλιεργειών και άλλες διατάξεις». Ο νόμος αυτός συγκρότησε ειδικότερο θεσμικό πλαίσιο ανάπτυξης του τομέα, ρυθμίζοντας ζητήματα παραχώρησης χρήσης θαλάσσιων και λιμναίων υδάτινων εκτάσεων, ίδρυσης και λειτουργίας μονάδων, καθώς και διοικητικής οργάνωσης του τομέα. Στο άρθρο 1 του νόμου ορίζεται ότι οι διατάξεις του καθορίζουν το θεσμικό πλαίσιο ανάπτυξης των υδατοκαλλιεργειών στο πλαίσιο της αειφόρου λειτουργίας τους, ιδίως ως προς την παραχώρηση χρήσης υδάτινων εκτάσεων για εγκατάσταση μονάδων (ΦΕΚ 182/Α/2014). Ο Ν. 4282/2014 είναι ιδιαίτερα σημαντικός διότι μεταφέρει το ζήτημα από το επίπεδο του χωροταξικού σχεδιασμού στο επίπεδο της επιχειρησιακής εφαρμογής: πώς παραχωρείται ο χώρος, ποιος αδειοδοτεί, ποια όργανα γνωμοδοτούν και πώς θεσμικά οργανώνεται η ανάπτυξη του κλάδου.

Ένα από τα κρίσιμα στοιχεία του Ν. 4282/2014 είναι η πρόβλεψη Εθνικού Προγράμματος Ανάπτυξης Υδατοκαλλιεργειών και Εθνικού Συμβουλίου Υδατοκαλλιεργειών, γεγονός που δείχνει την προσπάθεια μετάβασης από την αποσπασματική διοίκηση σε πιο προγραμματική πολιτική για τον κλάδο (https://www.forin.gr/laws/law/3224/anaptuksh-udatokalliergeiwn-kai-alles diatakseis).

Η ύπαρξη τέτοιων εργαλείων είναι σημαντική, επειδή οι υδατοκαλλιέργειες δεν μπορούν να σχεδιαστούν μόνο με όρους χωρικής καταλληλότητας, αλλά απαιτούν συντονισμό με την παραγωγική πολιτική, την αλιευτική πολιτική, την περιφερειακή ανάπτυξη, την περιβαλλοντική αδειοδότηση και τη διαχείριση των υδάτων. Ωστόσο, η

ύπαρξη θεσμικού πλαισίου δεν συνεπάγεται αυτομάτως αποτελεσματική εφαρμογή, καθώς η εμπειρία της Ελλάδας δείχνει ότι οι καθυστερήσεις στον θαλάσσιο χωροταξικό σχεδιασμό και στη θεσμοθέτηση οργανωμένων υποδοχέων παραμένουν σημαντική πρόκληση.

Στο επίπεδο της περιβαλλοντικής προστασίας, το ελληνικό σύστημα βασίζεται σε πολλαπλές διατάξεις που λειτουργούν συμπληρωματικά. Ο Ν. 1650/1986 συγκροτεί το βασικό πλαίσιο προστασίας του περιβάλλοντος, ενώ ο Ν. 3010/2002 τον τροποποίησε στο πλαίσιο εναρμόνισης με ευρωπαϊκές οδηγίες για την εκτίμηση περιβαλλοντικών επιπτώσεων και την ολοκληρωμένη πρόληψη και έλεγχο της ρύπανσης. Το ίδιο το Ειδικό Πλαίσιο του 2011 αναφέρει ρητά αυτές τις διατάξεις ως μέρος του θεσμικού υποβάθρου αδειοδότησης των μονάδων υδατοκαλλιέργειας. Αντίστοιχα, ο Ν. 3199/2003 και το Π.Δ. 51/2007 ενσωματώνουν την Οδηγία-Πλαίσιο για τα Ύδατα, γεγονός που συνδέει τη χωροθέτηση των μονάδων με την ποιότητα των παράκτιων υδάτων και τη διατήρηση της καλής οικολογικής κατάστασης. (ΦΕΚ 2505/Β/2011)

Το εθνικό πλαίσιο διαφοροποιείται επίσης από μια καθαρά παραγωγική πολιτική, επειδή ενσωματώνει ζητήματα βιοποικιλότητας, υγειονομικού ελέγχου, βιολογικής υδατοκαλλιέργειας και χρήσης ξένων ειδών. Το Ειδικό Πλαίσιο παραπέμπει στον Ν. 3937/2011 για τη διατήρηση της βιοποικιλότητας, στον Κανονισμό 710/2009 για τη βιολογική παραγωγή ζώων υδατοκαλλιέργειας και φυκιών, καθώς και στον Κανονισμό 708/2007 για τη χρήση ξένων και απόντων σε τοπικό επίπεδο ειδών στην υδατοκαλλιέργεια . Αυτές οι αναφορές δείχνουν ότι η εθνική πολιτική δεν αφορά μόνο την επιλογή θέσης, αλλά και τη φύση της παραγωγικής διαδικασίας, τα είδη που καλλιεργούνται, τις υγειονομικές προϋποθέσεις και την οικολογική συμβατότητα της δραστηριότητας. (ΦΕΚ 2505/Β/2011)

Σε επίπεδο εφαρμογής, ένα από τα πιο σύνθετα ζητήματα είναι η σχέση ΠΟΑΥ, τοπικών κοινωνιών και άλλων χρήσεων του παράκτιου χώρου. Η υδατοκαλλιέργεια στην Ελλάδα αναπτύχθηκε συχνά σε περιοχές με τουριστική δραστηριότητα, υψηλή αισθητική αξία ή περιβαλλοντική ευαισθησία. Η ΣΜΠΕ αναγνωρίζει ότι η απουσία οργάνωσης μπορεί αρχικά να ενισχύει την απασχόληση σε διάφορες περιοχές, αλλά δευτερογενώς δημιουργεί αρνητικές εξωτερικές οικονομίες που οδηγούν σε προβλήματα ανταγωνιστικότητας και πιέσεις στην απασχόληση (ΣΜΠΕ, 2011). Η παρατήρηση αυτή είναι σημαντική επειδή μεταφέρει τη συζήτηση από την απλή

περιβαλλοντική προστασία στην οικονομία του χώρου: μια δραστηριότητα μπορεί να παράγει τοπικό εισόδημα, αλλά αν δεν ενταχθεί σε οργανωμένο πλαίσιο, μπορεί να δημιουργήσει κόστος σε άλλες δραστηριότητες, όπως ο τουρισμός, η αλιεία μικρής κλίμακας ή η αναψυχή.

Η πρακτική εφαρμογή των ΠΟΑΥ αναδεικνύει και ένα δεύτερο ζήτημα: τη διαφορά ανάμεσα στον χωροταξικό καθορισμό μιας περιοχής και στην πραγματική δυνατότητα ολοκληρωμένης διαχείρισής της. Στο υλικό για τις ΠΟΑΥ επισημαίνεται ότι, ενώ ο θεσμός φαίνεται να συγκροτεί μια οντότητα με συγκεκριμένα γεωγραφικά όρια εντός μιας ΠΑΥ, υπάρχουν περιπτώσεις όπου η ΠΟΑΥ μπορεί να περιλαμβάνει μονάδες σε διαφορετικές ΠΑΥ, γεγονός που χαρακτηρίζεται ως σχεδιαστικό και λειτουργικό πρόβλημα . Η παρατήρηση αυτή είναι πολύ χρήσιμη για κριτική ανάλυση, διότι δείχνει ότι η αποτελεσματική διαχείριση δεν εξασφαλίζεται μόνο με θεσμική οριοθέτηση· απαιτεί οικολογική συνοχή, διοικητική λειτουργικότητα, κοινό σύστημα παρακολούθησης και πραγματική δυνατότητα εφαρμογής μέτρων.

Η ανάγκη ενίσχυσης των μηχανισμών παρακολούθησης αναγνωρίζεται και από το ίδιο το Ειδικό Πλαίσιο. Στις κατευθύνσεις του προβλέπεται ενίσχυση των ελεγκτικών μηχανισμών για τη συστηματική παρακολούθηση τόσο της περιβαλλοντικής επιβάρυνσης από τη λειτουργία των υδατοκαλλιεργειών όσο και της κατάστασης των παράκτιων υδατικών οικοσυστημάτων, ώστε να δημιουργηθεί αξιόπιστη χρονοσειρά δεδομένων . Αυτό είναι ένα από τα πιο ουσιαστικά σημεία του εθνικού πλαισίου, επειδή η βιώσιμη διαχείριση δεν μπορεί να βασίζεται μόνο σε αρχικές μελέτες αδειοδότησης, αλλά απαιτεί συνεχή δεδομένα για οργανική φόρτιση, ποιότητα νερού, βενθικές κοινότητες, υδροδυναμικές συνθήκες και πιθανές σωρευτικές επιπτώσεις.

Συμπληρωματικά, η ελληνική εμπειρία συνδέεται με το ευρύτερο ζήτημα του θαλάσσιου χωροταξικού σχεδιασμού. Σύμφωνα με το προφίλ της Ευρωπαϊκής Πλατφόρμας Θαλάσσιου Χωροταξικού Σχεδιασμού για την Ελλάδα, μέχρι το 2022 η χώρα δεν είχε ακόμη υιοθετήσει επισήμως εθνικά ή περιφερειακά θαλάσσια χωροταξικά σχέδια, αν και διέθετε τομεακά ειδικά πλαίσια για δραστηριότητες όπως οι υδατοκαλλιέργειες, ο τουρισμός, η βιομηχανία και οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, τα οποία περιλαμβάνουν ρυθμίσεις για παράκτια και θαλάσσια τμήματα (EU Commission, 2022). Αυτό σημαίνει ότι το Ειδικό Πλαίσιο για τις υδατοκαλλιέργειες λειτούργησε για χρόνια ως de facto εργαλείο θαλάσσιου χωρικού σχεδιασμού για τον

συγκεκριμένο κλάδο, πριν ολοκληρωθεί ένα συνολικό εθνικό θαλάσσιο χωροταξικό πλαίσιο.

Η καθυστέρηση αυτή έχει θεσμική σημασία. Η Ελλάδα υποχρεωνόταν, βάσει της Οδηγίας 2014/89/ΕΕ, να καταρτίσει θαλάσσια χωροταξικά σχέδια, όμως η διαδικασία υλοποίησης καθυστέρησε σημαντικά. Το 2025 αναφέρθηκε ότι η Ελλάδα υπέβαλε τα θαλάσσια χωροταξικά της σχέδια στην Ευρωπαϊκή Ένωση, έπειτα από διαδικασίες και πιέσεις που συνδέονταν με την καθυστέρηση συμμόρφωσης προς τις ευρωπαϊκές υποχρεώσεις (https://www.reuters.com/world/europe/greece-submits-plans-maritime-use-after-falling-foul-eu-rules-2025-04-16) . Η εξέλιξη αυτή είναι σημαντική για την εργασία, επειδή δείχνει ότι ο τομεακός σχεδιασμός των υδατοκαλλιεργειών προηγήθηκε ουσιαστικά του ολοκληρωμένου θαλάσσιου χωροταξικού σχεδιασμού της χώρας, γεγονός που δημιουργεί ερωτήματα για τον βαθμό συντονισμού μεταξύ υδατοκαλλιεργειών, τουρισμού, ναυσιπλοΐας, προστατευόμενων περιοχών και ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

Σε παραγωγικό επίπεδο, η σημασία του εθνικού πλαισίου ενισχύεται από το γεγονός ότι η Ελλάδα αποτελεί κορυφαίο παραγωγό τσιπούρας και λαβρακιού στην Ευρωπαϊκή Ένωση και σημαντική δύναμη στη Μεσόγειο. Η χωρική οργάνωση του κλάδου, δεν αφορά μια περιθωριακή παραγωγική δραστηριότητα, αλλά έναν εξαγωγικό τομέα με ιδιαίτερο ρόλο στην εθνική οικονομία και στην απασχόληση παράκτιων και νησιωτικών περιοχών (https://aquaculture.ec.europa.eu/country-information/greece). Το γεγονός αυτό εξηγεί γιατί το εθνικό πλαίσιο επιχειρεί να ισορροπήσει μεταξύ δύο απαιτήσεων που συχνά βρίσκονται σε ένταση: αφενός την ενίσχυση της ανταγωνιστικότητας και αφετέρου την προστασία του θαλάσσιου περιβάλλοντος.

Επομένως, σε αντίθεση με μια απλή περιγραφή νόμων, το εθνικό πλαίσιο πρέπει να γίνει αντιληπτό ως πολυεπίπεδο σύστημα διακυβέρνησης. Στο πρώτο επίπεδο βρίσκεται ο γενικός χωροταξικός σχεδιασμός, με βάση τον Ν. 2742/1999 και τα ειδικά χωροταξικά πλαίσια. Στο δεύτερο επίπεδο βρίσκεται το τομεακό πλαίσιο των υδατοκαλλιεργειών, με την ΚΥΑ 31722/2011 και τα εργαλεία ΠΑΥ, ΠΟΑΥ και ΠΑΣΜ. Στο τρίτο επίπεδο βρίσκεται η επιχειρησιακή αδειοδότηση και παραχώρηση χρήσης υδάτινων εκτάσεων, όπως ρυθμίζεται ιδίως από τον Ν. 4282/2014. Στο τέταρτο επίπεδο βρίσκεται η περιβαλλοντική αξιολόγηση, μέσω της νομοθεσίας για ΜΠΕ, προστασία υδάτων, Natura 2000 και βιοποικιλότητα. Η αποτελεσματικότητα του συστήματος

εξαρτάται από τον συντονισμό αυτών των επιπέδων και όχι μόνο από την ύπαρξη κάθε εργαλείου ξεχωριστά.

Με βάση τα παραπάνω, η ελληνική περίπτωση παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον επειδή συνδυάζει ισχυρή παραγωγική εξειδίκευση, σύνθετο παράκτιο χώρο, περιβαλλοντική ευαισθησία και καθυστερήσεις στη θεσμική εφαρμογή. Η μετάβαση από τη διάσπαρτη χωροθέτηση στην οργανωμένη ανάπτυξη μέσω ΠΟΑΥ αποτελεί σημαντική πρόοδο, αλλά η επιτυχία της εξαρτάται από την πραγματική εφαρμογή συστημάτων παρακολούθησης, την ποιότητα των δεδομένων, τη συμμετοχή των τοπικών κοινωνιών, τη σαφή διοικητική αρμοδιότητα και τη σύνδεση του τομεακού σχεδιασμού με τον συνολικό θαλάσσιο χωροταξικό σχεδιασμό της χώρας.

Το ελληνικό θεσμικό πλαίσιο για τις υδατοκαλλιέργειες διαμορφώθηκε σταδιακά, μεταβαίνοντας από ένα σύστημα διάσπαρτων αδειοδοτήσεων και σημειακών χωροθετήσεων σε ένα πιο οργανωμένο μοντέλο τομεακού χωροταξικού σχεδιασμού. Η εξέλιξη αυτή κορυφώνεται με το Ειδικό Χωροταξικό Πλαίσιο του 2011 και τη θεσμοθέτηση εργαλείων όπως οι ΠΑΥ, ΠΟΑΥ και ΠΑΣΜ, ενώ συμπληρώνεται από το πλαίσιο περιβαλλοντικής προστασίας, διαχείρισης υδάτων, βιοποικιλότητας και επιχειρησιακής αδειοδότησης. Συνολικά, η ελληνική περίπτωση δείχνει ότι η βιώσιμη ανάπτυξη της υδατοκαλλιέργειας δεν εξαρτάται μόνο από την ύπαρξη νόμων, αλλά από τον συντονισμό χωροταξικού σχεδιασμού, περιβαλλοντικής παρακολούθησης, παραγωγικής πολιτικής και συμμετοχής των τοπικών κοινωνιών.

Πίνακας 1: *Συγκεντρωτικός πίνακας ελληνική νομοθεσίας*

Νομοθέτημα / εργαλείο	**Αντικείμενο**	**Κύρια ρύθμιση / περιεχόμενο**	**Σημασία για τις υδατοκαλλιέργειες**
Ν. 1650/1986	Προστασία περιβάλλοντος	Βασικό θεσμικό πλαίσιο περιβαλλοντικής προστασίας στην Ελλάδα.	Αποτελεί τη βάση για την περιβαλλοντική αδειοδότηση και την αξιολόγηση επιπτώσεων των

Νομοθέτημα / εργαλείο	Αντικείμενο	Κύρια ρύθμιση / περιεχόμενο	Σημασία για τις υδατοκαλλιέργειες
			μονάδων υδατοκαλλιέργειας.
ΚΥΑ 69269/5387/1990	Μελέτες Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων	Ρύθμιση διαδικασιών ΜΠΕ για έργα και δραστηριότητες.	Συνδέει την ίδρυση και λειτουργία μονάδων με την εκτίμηση των περιβαλλοντικών τους επιπτώσεων.
Ν. 2742/1999	Χωροταξικός σχεδιασμός και αειφόρος ανάπτυξη	Εισήγαγε τα ειδικά πλαίσια χωροταξικού σχεδιασμού για δραστηριότητες εθνικής σημασίας.	Θέτει τη βάση ώστε η υδατοκαλλιέργεια να αντιμετωπίζεται ως παραγωγικός τομέας που χρειάζεται οργανωμένη χωρική ανάπτυξη.
ΥΑ Η.Π. 17239/2002	ΠΟΑΥ	Καθόρισε δικαιολογητικά, διαδικασία και προϋποθέσεις χωροθέτησης Περιοχών Οργανωμένης Ανάπτυξης Υδατοκαλλιεργειών.	Εισάγει την έννοια οργανωμένων χωρικών υποδοχέων για μονάδες υδατοκαλλιέργειας.
Ν. 3010/2002	Τροποποίηση Ν. 1650/1986	Εναρμόνιση με ευρωπαϊκές οδηγίες για εκτίμηση	Ενισχύει το περιβαλλοντικό σκέλος της

Νομοθέτημα / εργαλείο	Αντικείμενο	Κύρια ρύθμιση / περιεχόμενο	Σημασία για τις υδατοκαλλιέργειες
		περιβαλλοντικών επιπτώσεων και πρόληψη/έλεγχο ρύπανσης.	αδειοδότησης των μονάδων.
Ν. 3199/2003 & Π.Δ. 51/2007	Προστασία και διαχείριση υδάτων	Ενσωμάτωση της Οδηγίας-Πλαίσιο για τα Ύδατα.	Συνδέουν τη χωροθέτηση και λειτουργία των μονάδων με την ποιότητα των παράκτιων υδάτων και την καλή οικολογική κατάσταση.
ΚΥΑ 31722/2011 / ΦΕΚ 2505/Β/2011	Ειδικό Χωροταξικό Πλαίσιο για τις Υδατοκαλλιέργειες	Θεσπίζει κατευθύνσεις, κανόνες και κριτήρια για τη χωρική διάρθρωση, οργάνωση και ανάπτυξη του κλάδου.	Είναι το βασικό εργαλείο χωρικής οργάνωσης των υδατοκαλλιεργειών στην Ελλάδα και συνδέει την ανάπτυξη του κλάδου με την προστασία του περιβάλλοντος και την ανταγωνιστικότητα.
ΣΜΠΕ Ειδικού Πλαισίου 2011	Στρατηγική περιβαλλοντική αξιολόγηση	Αξιολόγησε σενάρια χωρικής οργάνωσης και έκρινε αρνητικά	Τεκμηριώνει ότι η μη οργανωμένη χωροθέτηση δημιουργεί

Νομοθέτημα / εργαλείο	Αντικείμενο	Κύρια ρύθμιση / περιεχόμενο	Σημασία για τις υδατοκαλλιέργειες
		το σενάριο μη παρέμβασης.	περιβαλλοντικές, οικονομικές και κοινωνικές πιέσεις.
ΠΑΥ	Περιοχές Ανάπτυξης Υδατοκαλλιεργειών	Ευρύτερες θαλάσσιες περιοχές κατάλληλες για ανάπτυξη υδατοκαλλιεργητικών δραστηριοτήτων.	Λειτουργούν ως χωρικό επίπεδο εντοπισμού κατάλληλων περιοχών για τον κλάδο.
ΠΟΑΥ	Περιοχές Οργανωμένης Ανάπτυξης Υδατοκαλλιεργειών	Οργανωμένες ζώνες με φορέα διαχείρισης, περιβαλλοντική παρακολούθηση και δυνατότητα συγκέντρωσης μονάδων.	Αποτελούν το βασικό εργαλείο οργανωμένης χωροθέτησης και διαχείρισης σωρευτικών επιπτώσεων.
ΠΑΣΜ	Περιοχές Άτυπης Συγκέντρωσης Μονάδων	Περιοχές όπου υπάρχουν συγκεντρώσεις υφιστάμενων μονάδων χωρίς πλήρως οργανωμένο καθεστώς ΠΟΑΥ.	Αναγνωρίζουν τη μεταβατική πραγματικότητα του κλάδου και την προϋπάρχουσα χωρική διασπορά.
Ν. 3937/2011	Βιοποικιλότητα	Πλαίσιο προστασίας της βιοποικιλότητας.	Συνδέει τη χωροθέτηση και λειτουργία μονάδων με την οικολογική συμβατότητα και

Νομοθέτημα / εργαλείο	Αντικείμενο	Κύρια ρύθμιση / περιεχόμενο	Σημασία για τις υδατοκαλλιέργειες
			την προστασία ευαίσθητων περιοχών.
Ν. 4282/2014 / ΦΕΚ 182/Α/2014	Ανάπτυξη υδατοκαλλιεργειών	Ρυθμίζει την παραχώρηση χρήσης θαλάσσιων και λιμναίων εκτάσεων, την ίδρυση και λειτουργία μονάδων και τη διοικητική οργάνωση του τομέα.	Μεταφέρει το ζήτημα από τον χωροταξικό σχεδιασμό στην πρακτική αδειοδότηση και επιχειρησιακή εφαρμογή.
Εθνικό Πρόγραμμα Ανάπτυξης Υδατοκαλλιεργειών & Εθνικό Συμβούλιο Υδατοκαλλιεργειών	Προγραμματική πολιτική για τον κλάδο	Προβλέπονται από τον Ν. 4282/2014.	Δείχνουν προσπάθεια μετάβασης από αποσπασματική διοίκηση σε πιο συντονισμένη πολιτική ανάπτυξης του τομέα.
Θαλάσσιος Χωροταξικός Σχεδιασμός / Οδηγία 2014/89/ΕΕ	Ολοκληρωμένος σχεδιασμός θαλάσσιου χώρου	Υποχρέωση κατάρτισης θαλάσσιων χωροταξικών σχεδίων.	Αναδεικνύει την ανάγκη συντονισμού υδατοκαλλιεργειών με τουρισμό, ναυσιπλοΐα, προστατευόμενες περιοχές και άλλες θαλάσσιες χρήσεις.

1.4.1 Βιωσιμότητα στις υδατοκαλλιέργειες και ανάγκη συστηματικής αξιολόγησης

Η ιστορική εξέλιξη της υδατοκαλλιέργειας, όπως αναλύθηκε στο προηγούμενο υποκεφάλαιο, δείχνει ότι ο κλάδος μετασχηματίστηκε από συμπληρωματική παραγωγική δραστηριότητα σε βασικό πυλώνα του παγκόσμιου συστήματος υδρόβιων τροφίμων. Η μετάβαση αυτή δημιουργεί σημαντικές ευκαιρίες για την επισιτιστική ασφάλεια, την περιφερειακή ανάπτυξη και τη μείωση της πίεσης στα φυσικά ιχθυαποθέματα, αλλά ταυτόχρονα εγείρει κρίσιμα ερωτήματα σχετικά με τη μακροπρόθεσμη βιωσιμότητα των συστημάτων εκτροφής. Η υδατοκαλλιέργεια δεν μπορεί πλέον να αξιολογείται μόνο με βάση την παραγόμενη ποσότητα ή την οικονομική της απόδοση, αλλά πρέπει να εξετάζεται ως σύνθετο παραγωγικό σύστημα που αλληλεπιδρά με το υδάτινο περιβάλλον, την αλυσίδα εφοδιασμού, τις τοπικές κοινωνίες και το θεσμικό πλαίσιο διαχείρισης.

Η έννοια της βιωσιμότητας στις υδατοκαλλιέργειες περιλαμβάνει τρεις βασικές και αλληλένδετες διαστάσεις: την περιβαλλοντική, την οικονομική και την κοινωνική. Η περιβαλλοντική διάσταση αφορά την προστασία των υδάτινων οικοσυστημάτων, τη διατήρηση της ποιότητας των υδάτων, τη μείωση των εκπομπών και αποβλήτων, τη βιώσιμη χρήση ιχθυοτροφών και ενέργειας, καθώς και την αποφυγή υποβάθμισης οικοτόπων. Η οικονομική διάσταση σχετίζεται με την ανταγωνιστικότητα των μονάδων, τη σταθερότητα της παραγωγής, την αποδοτικότητα πόρων και τη δυνατότητα του κλάδου να λειτουργεί μακροπρόθεσμα χωρίς να εξαντλεί το περιβαλλοντικό του υπόβαθρο. Η κοινωνική διάσταση αφορά την απασχόληση, τη συμβολή στην τοπική ανάπτυξη, την κοινωνική αποδοχή, τη συμβατότητα με άλλες παράκτιες δραστηριότητες και την εμπιστοσύνη των καταναλωτών. Επομένως, η βιωσιμότητα δεν είναι μια μονοδιάστατη περιβαλλοντική έννοια, αλλά ένα πλαίσιο αξιολόγησης που απαιτεί ταυτόχρονη εξέταση παραγωγικότητας, οικολογικής αντοχής και κοινωνικής νομιμοποίησης.

Η ανάγκη για βιώσιμη αξιολόγηση προκύπτει από το γεγονός ότι οι επιπτώσεις της υδατοκαλλιέργειας είναι πολυεπίπεδες. Σε τοπικό επίπεδο, οι μονάδες μπορεί να επηρεάσουν την ποιότητα του νερού, τα ιζήματα, τις βενθικές κοινότητες και τη θαλάσσια τροφική αλυσίδα. Σε επίπεδο παραγωγικής αλυσίδας, σημαντικές επιπτώσεις μπορεί να προκύπτουν όχι μόνο από τη λειτουργία της μονάδας, αλλά και από την

παραγωγή ιχθυοτροφών, τη μεταφορά πρώτων υλών, την κατανάλωση ενέργειας, την επεξεργασία αποβλήτων και τη διανομή του τελικού προϊόντος. Το Πανεπιστήμιο Αιγαίου καταγράφει ότι οι επιδράσεις των υδατοκαλλιεργειών στο θαλάσσιο περιβάλλον μπορεί να αφορούν εμπλουτισμό οργανικής ύλης, αιωρούμενα σωματίδια, θόλωση του νερού, κατανάλωση οξυγόνου, διαταραχή άγριας πανίδας, αλληλεπιδράσεις μεταξύ εκτρεφόμενων και άγριων οργανισμών, εισαγωγή αλλόχθονων ειδών, ασθένειες και χρήση βιοενεργών ή χημικών ουσιών . Η ποικιλία αυτών των πιέσεων δείχνει ότι η βιωσιμότητα δεν μπορεί να τεκμηριωθεί μόνο με έναν μεμονωμένο δείκτη, αλλά απαιτεί σύνθετη και συστηματική αξιολόγηση.

Η παραδοσιακή περιβαλλοντική παρακολούθηση, η οποία συχνά επικεντρώνεται σε τοπικούς δείκτες, όπως η ποιότητα των υδάτων, το διαλυμένο οξυγόνο, τα θρεπτικά άλατα ή η κατάσταση των ιζημάτων, παραμένει απαραίτητη αλλά δεν επαρκεί από μόνη της. Παρέχει κρίσιμη εικόνα για την άμεση επίδραση μιας μονάδας στο περιβάλλον εγκατάστασης, όμως δεν αποτυπώνει το πλήρες περιβαλλοντικό αποτύπωμα του προϊόντος. Για παράδειγμα, μια μονάδα μπορεί να εμφανίζει αποδεκτή τοπική περιβαλλοντική επίδοση, αλλά να βασίζεται σε ιχθυοτροφές με υψηλό αποτύπωμα άνθρακα, σε πρώτες ύλες που προέρχονται από μη βιώσιμες πηγές ή σε ενεργοβόρες διεργασίες επεξεργασίας και μεταφοράς. Για τον λόγο αυτό, η αξιολόγηση της βιωσιμότητας πρέπει να μετατοπιστεί από τη στενή παρακολούθηση του σημείου παραγωγής σε μια συστημική προσέγγιση που εξετάζει ολόκληρη την αλυσίδα αξίας.

Σε αυτό το πλαίσιο, η Αξιολόγηση Κύκλου Ζωής, ή Life Cycle Assessment, έχει αναδειχθεί ως ένα από τα πιο σημαντικά εργαλεία περιβαλλοντικής αξιολόγησης των συστημάτων υδατοκαλλιέργειας. Η ΑΚΖ επιτρέπει την εκτίμηση των πιθανών περιβαλλοντικών επιπτώσεων ενός προϊόντος, μιας διεργασίας ή μιας δραστηριότητας σε ολόκληρο ή σε συγκεκριμένο τμήμα του κύκλου ζωής του. Όπως αναφέρεται σε σχετική μελέτη για την αειφορία της βιομηχανίας ιχθυοκαλλιεργειών, η αξιολόγηση του συνολικού περιβαλλοντικού αποτυπώματος είναι απαραίτητη για τη σύγκριση προϊόντων, τον εντοπισμό των διεργασιών με τον μεγαλύτερο αντίκτυπο και την εφαρμογή αλλαγών με στόχο τη βιώσιμη ανάπτυξη . Η ίδια πηγή χαρακτηρίζει την ΑΚΖ ως ισχυρό εργαλείο αξιολόγησης και σύγκρισης περιβαλλοντικών επιπτώσεων προϊόντων, διαδικασιών ή δραστηριοτήτων, τόσο για ολόκληρο όσο και για επιμέρους τμήματα του κύκλου ζωής τους (Πετρίδη Α., 2023).

Η μεθοδολογική σημασία της ΑΚΖ έγκειται στο ότι εξετάζει τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις από την εξόρυξη πόρων και την παραγωγή πρώτων υλών έως την παραγωγή, τη μεταφορά, τη χρήση, την επαναχρησιμοποίηση, την ανακύκλωση ή την τελική διάθεση και διαχείριση αποβλήτων. Στην περίπτωση της υδατοκαλλιέργειας, αυτό σημαίνει ότι η αξιολόγηση δεν περιορίζεται στους ιχθυοκλωβούς ή στις δεξαμενές εκτροφής, αλλά επεκτείνεται στην παραγωγή ιχθυοτροφών, στη λειτουργία εκκολαπτηρίων, στην πάχυνση, στην κατανάλωση ενέργειας και νερού, στην επεξεργασία αποβλήτων, στη συσκευασία, στη μεταφορά και στη διανομή. Με αυτόν τον τρόπο, η ΑΚΖ μπορεί να αναδείξει περιβαλλοντικά κρίσιμα σημεία που δεν είναι ορατά μέσω της τοπικής περιβαλλοντικής παρακολούθησης (Αγγελική Πετρίδη, 2023).

Η διεθνής βιβλιογραφία έχει δείξει ότι στις υδατοκαλλιέργειες μεγάλο μέρος των περιβαλλοντικών επιπτώσεων συνδέεται συχνά με την παραγωγή και σύνθεση των ιχθυοτροφών, ιδίως όσον αφορά τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, την ενεργειακή ζήτηση, τη χρήση πρώτων υλών και τις επιπτώσεις από την παραγωγή φυτικών ή ζωικών συστατικών (Pelletier et al., 2009; Henriksson et al., 2012; Bohnes et al., 2018). Παράλληλα, οι απώλειες θρεπτικών στοιχείων από μη καταναλωθείσα τροφή και μεταβολικά απόβλητα των εκτρεφόμενων οργανισμών συμβάλλουν στο δυναμικό ευτροφισμού, ιδιαίτερα σε περιοχές με περιορισμένη ανανέωση υδάτων ή υψηλή συγκέντρωση μονάδων (Wang et al., 2013; Milián-Sorribes et al., 2021). Επομένως, η βιωσιμότητα μιας μονάδας δεν καθορίζεται μόνο από τη διαχείριση εντός του χώρου εκτροφής, αλλά και από τις ανάντη και κατάντη διεργασίες που υποστηρίζουν την παραγωγή.

Η σύνδεση αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική για τη μεσογειακή ιχθυοκαλλιέργεια, όπου είδη όπως η τσιπούρα και το λαβράκι στηρίζονται σε συστήματα εντατικής θαλάσσιας εκτροφής με υψηλές απαιτήσεις σε τροφή και διαχείριση. Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις των συστημάτων αυτών εξαρτώνται από τη σύνθεση της τροφής, τον συντελεστή μετατρεψιμότητας τροφής, τη θνησιμότητα, τη διαχείριση υπολειμμάτων, τη θέση εγκατάστασης και τις υδροδυναμικές συνθήκες. Η χρήση της ΑΚΖ επιτρέπει να συγκριθούν διαφορετικά σενάρια παραγωγής, όπως συμβατικές τροφές έναντι εναλλακτικών πρωτεϊνών, ανοικτά συστήματα έναντι συστημάτων ανακυκλοφορίας, ή διαφορετικές πρακτικές διαχείρισης αποβλήτων. Με αυτόν τον τρόπο, η αξιολόγηση παύει να είναι απλώς περιγραφική και μετατρέπεται σε εργαλείο λήψης αποφάσεων.

Η βιώσιμη αξιολόγηση αποκτά ακόμη μεγαλύτερη σημασία όταν συνδυάζεται με την προσέγγιση Αξιολόγηση Κύκλου Ζωής, με στόχο τη σύγκριση της υφιστάμενης κατάστασης μιας μονάδας με μια μελλοντική κατάσταση που περιλάμβανε παρεμβάσεις εξοικονόμησης νερού και ανάκτησης προϊόντων προστιθέμενης αξίας και ενέργειας από απόβλητα . Η προσέγγιση αυτή είναι ιδιαίτερα χρήσιμη, διότι αποφεύγει τη μονομερή αξιολόγηση μιας περιβαλλοντικής παραμέτρου και εξετάζει τις αλληλεξαρτήσεις μεταξύ βασικών πόρων. Για παράδειγμα, ένα σύστημα μπορεί να μειώνει την κατανάλωση νερού αλλά να αυξάνει την κατανάλωση ενέργειας· αντίστοιχα, η επεξεργασία αποβλήτων μπορεί να δημιουργεί πρόσθετες ενεργειακές απαιτήσεις, αλλά να επιτρέπει ανάκτηση υλικών ή παραγωγή ενέργειας (Πετρίδη Α., 2023).

Η ανάγκη συστηματικής αξιολόγησης συνδέεται άμεσα και με τις πολιτικές βιώσιμης γαλάζιας οικονομίας. Η Ευρωπαϊκή Ένωση, μέσω εργαλείων όπως το Ευρωπαϊκό Ταμείο Θάλασσας, Αλιείας και Υδατοκαλλιέργειας, ενισχύει δράσεις που σχετίζονται με βιώσιμη αλιεία, βιώσιμη υδατοκαλλιέργεια, διατήρηση θαλάσσιων βιολογικών πόρων, επισιτιστική ασφάλεια και ανάπτυξη βιώσιμης γαλάζιας οικονομίας. Παράλληλα, η ενδιάμεση αξιολόγηση του EMFAF δείχνει ότι οι παρεμβάσεις του Ταμείου ταξινομούνται και ως προς τη συμβολή τους στη μείωση αρνητικών περιβαλλοντικών επιπτώσεων ή στην προσαρμογή και μετριασμό της κλιματικής αλλαγής, αν και επισημαίνεται ότι η αξιολόγηση αυτή έχει όρια, καθώς δεν διαφοροποιεί πάντα βραχυπρόθεσμες και μακροπρόθεσμες επιπτώσεις (European Comission, 2026). Το στοιχείο αυτό δείχνει ότι ακόμη και σε επίπεδο πολιτικής, η μέτρηση της βιωσιμότητας είναι σύνθετη και απαιτεί αξιόπιστα δεδομένα, σαφή κριτήρια και διαχρονική παρακολούθηση.

Συνολικά, η βιώσιμη ανάπτυξη της υδατοκαλλιέργειας δεν μπορεί να βασιστεί σε γενικές διακηρύξεις ή σε αποσπασματικά μέτρα. Απαιτεί συστηματική αξιολόγηση των περιβαλλοντικών, οικονομικών και κοινωνικών επιπτώσεων, καθώς και ενσωμάτωση εργαλείων όπως η ΑΚΖ, η ανάλυση Nexus, οι δείκτες περιβαλλοντικής απόδοσης και η συνεχής παρακολούθηση των τοπικών οικοσυστημάτων. Η εφαρμογή αυτών των μεθοδολογιών επιτρέπει στους φορείς του κλάδου να εντοπίζουν τα κρίσιμα σημεία περιβαλλοντικής επιβάρυνσης, στις ρυθμιστικές αρχές να σχεδιάζουν τεκμηριωμένες πολιτικές και στους καταναλωτές να αξιολογούν με μεγαλύτερη διαφάνεια τους ισχυρισμούς βιωσιμότητας. Επομένως, η βιωσιμότητα στις υδατοκαλλιέργειες δεν

αποτελεί στατική ιδιότητα ενός προϊόντος ή μιας μονάδας, αλλά αποτέλεσμα συνεχούς αξιολόγησης, προσαρμοστικής διαχείρισης και τεκμηριωμένης βελτίωσης.

1.4.2. Βέλτιστες πρακτικές για τη βιώσιμη διαχείριση και αξιολόγηση της αλιείας και της υδατοκαλλιέργειας

Η μετάβαση προς βιώσιμη υδατοκαλλιέργεια δεν μπορεί να επιτευχθεί μόνο μέσω αξιολογήσεων και μεθοδολογικών εργαλείων. Η Αξιολόγηση Κύκλου Ζωής, η ανάλυση Nexus και οι περιβαλλοντικοί δείκτες είναι απαραίτητα μέσα διάγνωσης και τεκμηρίωσης, αλλά η ουσιαστική βελτίωση προϋποθέτει την εφαρμογή βέλτιστων πρακτικών στη διαχείριση, στην τεχνολογία παραγωγής, στη διατροφή των εκτρεφόμενων οργανισμών, στη χωροθέτηση, στην παρακολούθηση και στη διακυβέρνηση. Με βάση τα προηγούμενα υποκεφάλαια, οι βέλτιστες πρακτικές μπορούν να γίνουν αντιληπτές ως η επιχειρησιακή μετάφραση της βιωσιμότητας: είναι οι πρακτικές μέσω των οποίων οι γενικές αρχές της περιβαλλοντικής προστασίας, της αποδοτικότητας πόρων και της κοινωνικής αποδοχής ενσωματώνονται στην καθημερινή λειτουργία των μονάδων.

Πρώτη κρίσιμη κατηγορία βέλτιστων πρακτικών είναι η βελτίωση της διαχείρισης των ιχθυοτροφών και των θρεπτικών εισροών. Η τροφή αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες περιβαλλοντικής επίδοσης της υδατοκαλλιέργειας, διότι συνδέεται τόσο με τις ανάντη επιπτώσεις παραγωγής πρώτων υλών όσο και με τις τοπικές επιπτώσεις από απώλειες θρεπτικών ουσιών στο υδάτινο περιβάλλον. Η βελτίωση της σύστασης των τροφών, η μείωση της εξάρτησης από ιχθυάλευρα και ιχθυέλαια άγριας προέλευσης, η χρήση εναλλακτικών πηγών πρωτεΐνης και η αύξηση της πεπτικότητας αποτελούν βασικές κατευθύνσεις βιώσιμης διαχείρισης (Pelletier et al., 2009; Milián-Sorribes et al., 2021). Εναλλακτικές πρώτες ύλες, όπως πρωτεΐνες εντόμων, μικροβιακή βιομάζα, φυτικά συμπυκνώματα, άλευρα υποπροϊόντων και νέες πηγές λιπαρών οξέων, μπορούν να συμβάλουν στη μείωση της πίεσης στους φυσικούς αλιευτικούς πόρους, υπό την προϋπόθεση ότι αξιολογούνται συστηματικά ως προς το δικό τους περιβαλλοντικό αποτύπωμα.

Η βελτίωση της τροφής δεν αφορά μόνο τη σύνθεση, αλλά και τον τρόπο χορήγησης. Η ακριβής σίτιση, η χρήση αισθητήρων, η παρακολούθηση συμπεριφοράς των ψαριών, τα συστήματα αυτόματης χορήγησης τροφής και η προσαρμογή των σιτηρεσίων στις πραγματικές ανάγκες ανάπτυξης μπορούν να μειώσουν τη μη καταναλωθείσα τροφή

και, συνεπώς, τη φόρτιση του θαλάσσιου περιβάλλοντος με άζωτο, φώσφορο και οργανική ύλη. Η σημασία της πρακτικής αυτής συνδέεται άμεσα με τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις που έχουν ήδη αναφερθεί, καθώς ο οργανικός εμπλουτισμός και η κατανάλωση οξυγόνου αποτελούν βασικούς μηχανισμούς υποβάθμισης σε περιοχές με περιορισμένη ανανέωση νερού. Το Πανεπιστήμιο Αιγαίου αναφέρει ότι ο εμπλουτισμός αφορά την απόθεση οργανικών ουσιών από τροφή, κόπρανα και μεταβολισμό των εκτρεφόμενων ζώων, ενώ σε παράκτιες ζώνες με υψηλή παραγωγικότητα και κακή ή μέτρια ανανέωση νερού μπορεί να συμβάλει σε ευτροφικά φαινόμενα. Επομένως, η ορθολογική σίτιση είναι ταυτόχρονα οικονομική και περιβαλλοντική πρακτική, καθώς μειώνει απώλειες πόρων και περιορίζει τις πιέσεις στο οικοσύστημα.

Δεύτερη κατηγορία βέλτιστων πρακτικών αφορά την τεχνολογική βελτίωση των συστημάτων παραγωγής. Τα συστήματα ανακυκλοφορίας νερού, γνωστά ως Recirculating Aquaculture Systems ή RAS, αποτελούν χαρακτηριστικό παράδειγμα τεχνολογίας που μπορεί να μειώσει την κατανάλωση νερού και να επιτρέψει καλύτερο έλεγχο των συνθηκών εκτροφής. Το Ειδικό Πλαίσιο αναγνωρίζει τα κλειστά κυκλώματα εκτροφής ως εκμεταλλεύσεις υπερεντατικής υδατοκαλλιέργειας που βασίζονται στην επαναχρησιμοποίηση του νερού εκτροφής, με χρήση τεχνητών μέσων και δημιουργία ελεγχόμενων συνθηκών, αλλά επισημαίνει επίσης ότι χαρακτηρίζονται από περιορισμένες ανάγκες σε νερό, υψηλό κόστος κατασκευής και λειτουργίας και αυξημένες διαχειριστικές απαιτήσεις . Η παρατήρηση αυτή είναι κρίσιμη, διότι δείχνει ότι τα RAS δεν είναι αυτομάτως βιώσιμα σε κάθε περίπτωση· η περιβαλλοντική τους επίδοση εξαρτάται από την πηγή ενέργειας, την αποδοτικότητα του εξοπλισμού, τη διαχείριση των στερεών και υγρών αποβλήτων και τη συνολική παραγωγική κλίμακα. (Badiola et al., 2018,ΦΕΚ 2505/2011)

Η χρήση RAS αποκτά ιδιαίτερη σημασία όταν συνδυάζεται με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, ανάκτηση πόρων και επεξεργασία αποβλήτων. Σε σχετική μελέτη για παρεμβάσεις σε βιομηχανία ιχθυοκαλλιέργειας, εξετάστηκαν συστήματα που αποσκοπούσαν στην εξοικονόμηση νερού και στην ανάκτηση προϊόντων προστιθέμενης αξίας και ενέργειας από απόβλητα, ενώ η αξιολόγηση πραγματοποιήθηκε με AKZ. Η λογική αυτή αντανακλά τη μετάβαση από το γραμμικό μοντέλο παραγωγής, όπου οι εισροές καταναλώνονται και τα απόβλητα απορρίπτονται, σε ένα κυκλικό μοντέλο, όπου οι ροές νερού, ενέργειας και υλικών επαναξιοποιούνται.

Έτσι, η βιωσιμότητα δεν ταυτίζεται απλώς με τη μείωση μιας επίπτωσης, αλλά με την επανασχεδίαση των διεργασιών ώστε να περιορίζεται η απώλεια πόρων. (Πετρίδη Α., 2023)(Badiola et al.,2018).

Τρίτη σημαντική πρακτική είναι η ανάπτυξη ολοκληρωμένων πολυτροφικών συστημάτων υδατοκαλλιέργειας, γνωστών ως Integrated Multi-Trophic Aquaculture ή IMTA. Η βασική ιδέα αυτών των συστημάτων είναι ότι οργανισμοί διαφορετικών τροφικών επιπέδων καλλιεργούνται σε συνδυασμό, ώστε οι εκροές ενός οργανισμού να αξιοποιούνται ως πόροι από άλλους. Για παράδειγμα, τα διαλυμένα θρεπτικά στοιχεία μπορούν να αξιοποιούνται από μακροφύκη, ενώ τα αιωρούμενα οργανικά σωματίδια μπορούν να αξιοποιούνται από δίθυρα μαλάκια ή άλλους διηθηματοφάγους οργανισμούς. Το Ειδικό Πλαίσιο ορίζει την πολυκαλλιέργεια ως εκτροφή ή καλλιέργεια δύο ή περισσότερων ειδών υδρόβιων οργανισμών, συνήθως διαφορετικών τροφικών επιπέδων, στις ίδιες εγκαταστάσεις . Η πρακτική αυτή έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον επειδή συνδέει την παραγωγικότητα με την οικολογική λειτουργία, μειώνοντας δυνητικά τις καθαρές εκροές θρεπτικών ουσιών. (Chopin et al.,2012;Υπουργείο Περιβάλλοντος, Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής,2011)

Η εφαρμογή IMTA, ωστόσο, απαιτεί προσεκτικό σχεδιασμό. Δεν αρκεί η απλή συνύπαρξη διαφορετικών ειδών στον ίδιο χώρο· απαιτείται ισορροπία βιομάζας, κατάλληλη χωρική διάταξη, γνώση των ρευμάτων, κατανόηση των ρυθμών πρόσληψης θρεπτικών και εμπορική αξιοποίηση των επιπλέον ειδών. Επομένως, η IMTA πρέπει να αντιμετωπίζεται ως σύνθετο οικολογικό και παραγωγικό σύστημα, και όχι ως απλή τεχνική προσθήκη. Η αποτελεσματικότητά της πρέπει να τεκμηριώνεται μέσω περιβαλλοντικής παρακολούθησης και ΑΚΖ, ώστε να αποφεύγεται η μετατόπιση επιπτώσεων από ένα επίπεδο του συστήματος σε άλλο. (Chopin et al. ,2012; Biswas et al.,2020)

Τέταρτη κατηγορία βέλτιστων πρακτικών αφορά τη χωροθέτηση και τον χωρικό σχεδιασμό, ο οποίος λειτουργεί ως προϋπόθεση βιώσιμης διαχείρισης. Η σύνδεση με το προηγούμενο κεφάλαιο είναι άμεση: ακόμη και η πιο προηγμένη τεχνολογία ή η καλύτερη διαχείριση τροφής δεν μπορεί να εξασφαλίσει βιωσιμότητα εάν μια μονάδα εγκατασταθεί σε περιοχή με χαμηλή ανανέωση υδάτων, υψηλή οικολογική ευαισθησία ή έντονη σύγκρουση χρήσεων. Το Πανεπιστήμιο Αιγαίου επισημαίνει ότι η ικανοποίηση των διεκδικήσεων διαφορετικών χρηστών της παράκτιας ζώνης απαιτεί

ρεαλιστικό χωροταξικό σχεδιασμό, βασισμένο σε λεπτομερή μελέτη λεκανών απορροής, ποιότητας νερών, ανανέωσης νερών, υφιστάμενων χρήσεων, λιμένων, παραγωγικών μονάδων και στρατηγικών στόχων βιώσιμης ανάπτυξης και προστασίας περιβάλλοντος . Επομένως, η χωροθέτηση δεν είναι διοικητική τυπικότητα, αλλά ουσιαστικό μέτρο πρόληψης περιβαλλοντικών και κοινωνικών συγκρούσεων. (Πανεπιστήμιο Αιγαίου [Διάλεξη]), Ross et al. (2013))

Η χρήση Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών, μοντέλων φέρουσας ικανότητας και πολυκριτηριακής ανάλυσης μπορεί να ενισχύσει τη χωροθέτηση μονάδων με βάση τεκμηριωμένα δεδομένα. Τέτοια εργαλεία επιτρέπουν την ταυτόχρονη αξιολόγηση παραμέτρων όπως βάθος, ρεύματα, απόσταση από προστατευόμενες περιοχές, απόσταση από τουριστικές χρήσεις, πρόσβαση σε υποδομές, ποιότητα νερού και δυνατότητα διάχυσης οργανικών φορτίων. Η λογική αυτή συνδέεται με τις ΠΑΥ και ΠΟΑΥ που αναλύθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, καθώς οι οργανωμένοι υποδοχείς μπορούν να λειτουργήσουν αποτελεσματικά μόνο εφόσον υποστηρίζονται από επαρκή περιβαλλοντικά δεδομένα και από μηχανισμούς παρακολούθησης. (Chentouf et al. , (2023); Ross et al. , (2013) ;Υπουργείο Περιβάλλοντος, Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής. (2011))

Πέμπτη πρακτική είναι η ενίσχυση της περιβαλλοντικής παρακολούθησης και της προσαρμοστικής διαχείρισης. Η παρακολούθηση δεν πρέπει να αντιμετωπίζεται ως τυπική υποχρέωση αδειοδότησης, αλλά ως μηχανισμός έγκαιρης προειδοποίησης και συνεχούς βελτίωσης. Η συστηματική συλλογή δεδομένων για ποιότητα νερού, διαλυμένο οξυγόνο, θρεπτικά άλατα, οργανική ύλη, κατάσταση ιζημάτων, βενθική μακροπανίδα, ασθένειες και θνησιμότητα επιτρέπει τη δυναμική προσαρμογή της παραγωγής στις συνθήκες του οικοσυστήματος. Σε περιοχές με σημάδια επιβάρυνσης μπορούν να εφαρμοστούν πρακτικές όπως μείωση πυκνότητας εκτροφής, αλλαγή στρατηγικής σίτισης, μετακίνηση κλωβών εντός μισθωμένης έκτασης ή υδρανάπαυση. Το Ειδικό Πλαίσιο περιλαμβάνει την έννοια της υδρανάπαυσης ως διαδικασία αντιμετώπισης περιβαλλοντικών επιπτώσεων από μονάδες ιχθυοκαλλιέργειας, η οποία συνίσταται στη μετακίνηση ιχθυοκλωβών σε άλλη θέση εντός της μισθωμένης έκτασης για ορισμένο χρονικό διάστημα. (Wang et al. , (2024); Fisheries New Zealand , (2022))

Έκτη κατηγορία βέλτιστων πρακτικών αφορά την υγεία και ευζωία των εκτρεφόμενων οργανισμών. Η βιώσιμη υδατοκαλλιέργεια δεν μπορεί να αποσυνδεθεί από τη

διαχείριση ασθενειών, τη μείωση της χρήσης φαρμακευτικών ουσιών και την πρόληψη βιοασφάλειας. Η εμφάνιση ασθενειών μπορεί να προκαλέσει οικονομικές απώλειες, αύξηση θνησιμότητας, χρήση θεραπευτικών ουσιών και πιθανές αλληλεπιδράσεις με άγριους πληθυσμούς. Η πρόληψη μέσω κατάλληλης πυκνότητας εκτροφής, εμβολιασμών, καλής ποιότητας νερού, ελέγχου εισόδου γόνου, βιοασφάλειας και συστηματικής κτηνιατρικής παρακολούθησης είναι πιο συμβατή με τη βιωσιμότητα από την εκ των υστέρων θεραπευτική αντιμετώπιση. Το ελληνικό χωροταξικό πλαίσιο ενσωματώνει ήδη την υγειονομική διάσταση μέσω αναφορών στις απαιτήσεις υγειονομικού ελέγχου για ζώα υδατοκαλλιέργειας και προϊόντα τους, γεγονός που δείχνει ότι η βιωσιμότητα συνδέεται και με την ασφάλεια παραγωγής. (GLOBALG.A.P. , (2025) ; Π.Δ. 28/2009 / Οδηγία 2006/88/)

Έβδομη πρακτική είναι η αξιοποίηση ψηφιακής παρακολούθησης, ιχνηλασιμότητας και διαφάνειας στην αλυσίδα εφοδιασμού. Η σύγχρονη βιώσιμη υδατοκαλλιέργεια πρέπει να μπορεί να τεκμηριώνει τις περιβαλλοντικές και παραγωγικές της επιδόσεις με δεδομένα. Η χρήση αισθητήρων, συστημάτων τηλεμετρίας, ψηφιακών μητρώων, πλατφορμών ιχνηλασιμότητας και τεχνολογιών blockchain μπορεί να ενισχύσει τη διαφάνεια ως προς την προέλευση, τις συνθήκες παραγωγής, τις τροφές, τις μεταφορές και τις περιβαλλοντικές επιδόσεις. Τέτοια συστήματα δεν αντικαθιστούν την περιβαλλοντική αξιολόγηση, αλλά την ενισχύουν, καθώς επιτρέπουν τη συλλογή και επαλήθευση δεδομένων κατά μήκος της αλυσίδας αξίας. Η ιχνηλασιμότητα αποκτά ιδιαίτερη σημασία σε αγορές όπου οι καταναλωτές, οι λιανέμποροι και οι ρυθμιστικές αρχές απαιτούν τεκμηριωμένους ισχυρισμούς βιωσιμότητας. (Shamsuzzoha et al. ,(2024); Mileti et al. , (2022))

Όγδοη κατηγορία αφορά τα συστήματα πιστοποίησης και τη θεσμική διακυβέρνηση. Πρότυπα όπως ASC, GlobalG.A.P. και βιολογική υδατοκαλλιέργεια λειτουργούν ως μηχανισμοί εξωτερικής επιβεβαίωσης πρακτικών που σχετίζονται με το περιβάλλον, την υγεία των οργανισμών, την ασφάλεια τροφίμων, την κοινωνική ευθύνη και τη διαχείριση πόρων. Παρότι τα πρότυπα πιστοποίησης δεν είναι από μόνα τους επαρκή για να εγγυηθούν πλήρη βιωσιμότητα, μπορούν να ενισχύσουν τη διαφάνεια, την πρόσβαση σε απαιτητικές αγορές και την εμπιστοσύνη των καταναλωτών. Η αποτελεσματικότητά τους εξαρτάται από την αυστηρότητα των κριτηρίων, την ανεξαρτησία των ελέγχων, τη συχνότητα επιθεώρησης και τη δυνατότητα σύνδεσης με

πραγματικά δεδομένα περιβαλλοντικής επίδοσης. (Aquaculture Stewardship Council. ,(2025) ; GLOBALG.A.P. , (2025))

Η διακυβέρνηση αποτελεί εξίσου σημαντική διάσταση των βέλτιστων πρακτικών. Η συμμετοχή των ενδιαφερόμενων φορέων, η διαβούλευση με τοπικές κοινωνίες, η συνεργασία με αλιείς, τουριστικούς φορείς, επιστημονικά ιδρύματα και περιβαλλοντικές αρχές μπορεί να μειώσει τις συγκρούσεις και να ενισχύσει την κοινωνική αποδοχή. Η βιωσιμότητα δεν επιτυγχάνεται μόνο με τεχνικές λύσεις, αλλά και με διαδικασίες λογοδοσίας, διαφάνειας και προσαρμοστικής διαχείρισης. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό στην Ελλάδα, όπου η υδατοκαλλιέργεια συνδέεται στενά με τον παράκτιο χώρο, τον τουρισμό και την τοπική ανάπτυξη. (Πανεπιστήμιο Αιγαίου [Διάλεξη]); ΣΜΠΕ,Υπουργείο Περιβάλλοντος, Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής ,(2011); Ross et al. , (2013))

Τέλος, οι βέλτιστες πρακτικές πρέπει να αξιολογούνται διαρκώς μέσω μεθοδολογιών όπως η AKZ. Μια πρακτική που μειώνει μια συγκεκριμένη επίπτωση μπορεί να αυξάνει μια άλλη. Για παράδειγμα, τα συστήματα RAS μπορούν να μειώσουν την κατανάλωση νερού και τις άμεσες εκροές, αλλά μπορεί να αυξήσουν την ενεργειακή ζήτηση. Οι εναλλακτικές πρωτεΐνες μπορούν να μειώσουν την εξάρτηση από ιχθυάλευρα, αλλά ενδέχεται να έχουν δικές τους επιπτώσεις σε χρήση γης, ενέργεια ή επεξεργασία. Η IMTA μπορεί να βελτιώσει την αξιοποίηση θρεπτικών ουσιών, αλλά απαιτεί χωρικό σχεδιασμό, αγορά για τα πρόσθετα είδη και οικολογική ισορροπία. Επομένως, οι βέλτιστες πρακτικές δεν πρέπει να θεωρούνται σταθερές λύσεις, αλλά δυναμικά εργαλεία που πρέπει να επαληθεύονται με δεδομένα.

Συμπερασματικά, η βιώσιμη διαχείριση της αλιείας και της υδατοκαλλιέργειας απαιτεί συνδυασμό τεχνολογικής καινοτομίας, χωροταξικού σχεδιασμού, αποδοτικής χρήσης πόρων, περιβαλλοντικής παρακολούθησης, κοινωνικής συμμετοχής και συστηματικής αξιολόγησης. Οι πιο αποτελεσματικές στρατηγικές δεν είναι εκείνες που αντιμετωπίζουν μεμονωμένα ένα πρόβλημα, αλλά εκείνες που ενσωματώνουν ολόκληρο το σύστημα παραγωγής, από την τροφή και το νερό έως την ενέργεια, τα απόβλητα, την αγορά και την κοινωνική αποδοχή. Με αυτή την έννοια, οι βέλτιστες πρακτικές αποτελούν το πρακτικό πεδίο εφαρμογής της βιωσιμότητας: μετατρέπουν τις θεσμικές αρχές, τις ευρωπαϊκές στρατηγικές και τα εργαλεία αξιολόγησης σε

συγκεκριμένες επιλογές διαχείρισης που μπορούν να μειώσουν τις περιβαλλοντικές πιέσεις και να ενισχύσουν τη μακροχρόνια ανθεκτικότητα του κλάδου.

***Πίνακας 2**: Κύρια σημεία των βέλτιστων πρακτικών*

Κατηγορία βέλτιστης πρακτικής	**Κύρια σημεία**	**Στόχος / συμβολή στη βιωσιμότητα**
Διαχείριση ιχθυοτροφών και θρεπτικών εισροών	Βελτίωση σύστασης τροφών, μείωση εξάρτησης από ιχθυάλευρα/ιχθυέλαια, χρήση εναλλακτικών πρωτεϊνών, αύξηση πεπτικότητας.	Μείωση πίεσης στους φυσικούς αλιευτικούς πόρους και περιορισμός περιβαλλοντικού αποτυπώματος της τροφής.
Ορθολογική και ακριβής σίτιση	Χρήση αισθητήρων, αυτόματων συστημάτων σίτισης, παρακολούθηση συμπεριφοράς ψαριών και προσαρμογή σιτηρεσίων.	Μείωση μη καταναλωθείσας τροφής, οργανικού φορτίου, αζώτου και φωσφόρου στο θαλάσσιο περιβάλλον.
Τεχνολογική βελτίωση παραγωγής — RAS	Συστήματα ανακυκλοφορίας νερού, καλύτερος έλεγχος συνθηκών εκτροφής, περιορισμένες ανάγκες σε νερό.	Εξοικονόμηση νερού και μείωση άμεσων εκροών, υπό την προϋπόθεση σωστής ενεργειακής και αποβλητικής διαχείρισης.
Κυκλική διαχείριση πόρων και αποβλήτων	Ανάκτηση ενέργειας, επαναχρησιμοποίηση νερού, αξιοποίηση αποβλήτων και προϊόντων προστιθέμενης αξίας.	Μετάβαση από γραμμικό σε κυκλικό μοντέλο παραγωγής και περιορισμός απώλειας πόρων.
Ολοκληρωμένη πολυτροφική	Συνδυασμός ειδών διαφορετικών τροφικών	Αξιοποίηση εκροών ενός οργανισμού ως πόρων για

Κατηγορία βέλτιστης πρακτικής	Κύρια σημεία	Στόχος / συμβολή στη βιωσιμότητα
υδατοκαλλιέργεια — ΙΜΤΑ	επιπέδων, όπως ψάρια, μακροφύκη και δίθυρα.	άλλους και πιθανή μείωση θρεπτικών αποβλήτων.
Ορθός χωροταξικός σχεδιασμός	Επιλογή περιοχών με βάση βάθος, ρεύματα, ανανέωση νερών, οικολογική ευαισθησία και συγκρούσεις χρήσεων.	Πρόληψη περιβαλλοντικών πιέσεων και κοινωνικών συγκρούσεων.
Χρήση GIS και μοντέλων φέρουσας ικανότητας	Πολυκριτηριακή ανάλυση, χωρικά δεδομένα, αξιολόγηση προστατευόμενων περιοχών, τουριστικών χρήσεων και υποδομών.	Τεκμηριωμένη χωροθέτηση και καλύτερη οργάνωση ΠΑΥ/ΠΟΑΥ.
Περιβαλλοντική παρακολούθηση	Παρακολούθηση ποιότητας νερού, διαλυμένου οξυγόνου, θρεπτικών, ιζημάτων, βενθικής μακροπανίδας, ασθενειών και θνησιμότητας.	Έγκαιρη αναγνώριση επιβαρύνσεων και συνεχής βελτίωση της διαχείρισης.
Προσαρμοστική διαχείριση	Μείωση πυκνότητας, αλλαγή σίτισης, μετακίνηση κλωβών, υδρανάπαυση.	Προσαρμογή της παραγωγής στις πραγματικές περιβαλλοντικές συνθήκες.
Υγεία και ευζωία οργανισμών	Βιοασφάλεια, εμβολιασμοί, κατάλληλη πυκνότητα εκτροφής, ποιοτικός γόνος, κτηνιατρική παρακολούθηση.	Μείωση ασθενειών, θνησιμότητας και ανάγκης χρήσης φαρμακευτικών ουσιών.
Ψηφιακή παρακολούθηση και ιχνηλασιμότητα	Αισθητήρες, τηλεμετρία, ψηφιακά μητρώα, πλατφόρμες ιχνηλασιμότητας.	Ενίσχυση διαφάνειας και τεκμηρίωση περιβαλλοντικών και παραγωγικών επιδόσεων.

Κατηγορία βέλτιστης πρακτικής	Κύρια σημεία	Στόχος / συμβολή στη βιωσιμότητα
Πιστοποιήσεις και πρότυπα	ASC, GLOBALG.A.P., βιολογική υδατοκαλλιέργεια.	Εξωτερική επιβεβαίωση πρακτικών βιωσιμότητας και ενίσχυση εμπιστοσύνης αγοράς/καταναλωτών.
Θεσμική διακυβέρνηση και συμμετοχή φορέων	Διαβούλευση με τοπικές κοινωνίες, συνεργασία με αλιείς, τουριστικούς φορείς, αρχές και επιστημονικούς οργανισμούς.	Μείωση συγκρούσεων, κοινωνική αποδοχή και ενίσχυση λογοδοσίας.
Συνεχής αξιολόγηση μέσω ΑΚΖ	Έλεγχος πιθανής μετατόπισης επιπτώσεων μεταξύ νερού, ενέργειας, γης, τροφών και αποβλήτων.	Διασφάλιση ότι μια πρακτική είναι πραγματικά βιώσιμη συνολικά και όχι μόνο σε μία περιβαλλοντική διάσταση.

Προκύπτει, όπως φαίνεται και στον παραπάνω πίνακα, οι βέλτιστες πρακτικές δεν είναι μία μεμονωμένη λύση, αλλά ένας συνδυασμός τεχνολογίας, σωστής χωροθέτησης, αποδοτικής χρήσης πόρων, παρακολούθησης, διαφάνειας και συμμετοχικής διακυβέρνησης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. Υδατοκαλλιέργειες και Περιβαλλοντικές Επιπτώσεις

2.1. Εισαγωγή: από τη βιωσιμότητα στην αξιολόγηση περιβαλλοντικών επιπτώσεων

Στο προηγούμενο κεφάλαιο αναφέρθηκε η έννοια της βιωσιμότητας στις υδατοκαλλιέργειες και αναδείχθηκε ότι η περιβαλλοντική, οικονομική και κοινωνική διάσταση του κλάδου δεν μπορούν να εξετάζονται απομονωμένα. Η υδατοκαλλιέργεια αποτελεί πλέον έναν από τους σημαντικότερους τομείς παραγωγής υδρόβιων τροφίμων, με καθοριστικό ρόλο στην επισιτιστική ασφάλεια, στην οικονομική

ανάπτυξη παράκτιων περιοχών και στη μείωση της πίεσης σε ορισμένα φυσικά ιχθυαποθέματα. Ωστόσο, η ανάπτυξη αυτή συνοδεύεται από περιβαλλοντικές πιέσεις, οι οποίες πρέπει να αναγνωρίζονται, να ποσοτικοποιούνται και να αξιολογούνται με συστηματικό τρόπο.

Η περιβαλλοντική διάσταση των υδατοκαλλιεργειών δεν αφορά μόνο την άμεση σχέση της μονάδας με το θαλάσσιο ή υδάτινο περιβάλλον εγκατάστασης. Αντίθετα, περιλαμβάνει ένα σύνολο αλληλεπιδράσεων που εκτείνονται από τη χωροθέτηση και τη λειτουργία των μονάδων έως την παραγωγή ιχθυοτροφών, την κατανάλωση νερού και ενέργειας, τη διαχείριση αποβλήτων, τη μεταφορά προϊόντων και την τελική περιβαλλοντική επίδοση του συστήματος παραγωγής. Για τον λόγο αυτό, η ανάλυση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των υδατοκαλλιεργειών πρέπει να πραγματοποιείται σε δύο επίπεδα: αφενός στο τοπικό οικοσύστημα όπου εγκαθίσταται η μονάδα και αφετέρου στο συνολικό παραγωγικό σύστημα που υποστηρίζει τη λειτουργία της.

Η ανάγκη αυτή συνδέεται άμεσα με τη φύση της υδατοκαλλιέργειας ως ανθρωπογενούς δραστηριότητας. Σύμφωνα με το εκπαιδευτικό υλικό του Πανεπιστημίου Αιγαίου, η εκτροφή υδρόβιων οργανισμών στη θάλασσα αποτελεί δραστηριότητα που δεν προϋπήρχε στο συγκεκριμένο περιβάλλον εγκατάστασής της και, επομένως, προκαλεί επιπτώσεις στο θαλάσσιο περιβάλλον, των οποίων η σοβαρότητα και αναστρεψιμότητα εξαρτώνται από τον τύπο της εκτροφής, το επίπεδο παραγωγής και τα βιολογικά, φυσικά και χημικά χαρακτηριστικά της περιοχής (Πανεπιστήμιο Αιγαίου [Διάλεξη]). Η διατύπωση αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική, διότι δείχνει ότι οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις δεν είναι σταθερές ή ίδιες σε όλες τις μονάδες. Εξαρτώνται από το είδος του συστήματος, την ένταση παραγωγής, τη θέση εγκατάστασης, την υδροδυναμική ανανέωση των υδάτων και την ικανότητα του οικοσυστήματος να αφομοιώνει τις εισροές.

Η εκτίμηση περιβαλλοντικών επιπτώσεων στις υδατοκαλλιέργειες αποκτά κρίσιμη σημασία για τρεις βασικούς λόγους. Πρώτον, επιτρέπει την αναγνώριση των κύριων μηχανισμών πίεσης που συνδέονται με τη λειτουργία των μονάδων, όπως η οργανική επιβάρυνση, ο εμπλουτισμός του νερού και των ιζημάτων με άζωτο και φώσφορο, η κατανάλωση διαλυμένου οξυγόνου, η συσσώρευση οργανικού υλικού στον πυθμένα και η διαταραχή οικοτόπων ή άγριας πανίδας. Οι επιπτώσεις αυτές έχουν καταγραφεί εκτενώς στη βιβλιογραφία της θαλάσσιας υδατοκαλλιέργειας, όπου η μη

καταναλωθείσα τροφή και τα απεκκρίματα των εκτρεφόμενων οργανισμών αναγνωρίζονται ως βασικές πηγές οργανικής και θρεπτικής φόρτισης, με πιθανές συνέπειες στον ευτροφισμό, στα ιζήματα και στις βενθικές κοινότητες (Karakassis et al., 2000 ; Carroll et al., 2003; Tomassetti et al., 2016). Δεύτερον, η περιβαλλοντική αξιολόγηση επιτρέπει τη σύγκριση διαφορετικών τεχνολογιών, πρακτικών και σεναρίων διαχείρισης, όπως η συμβατική εκτροφή σε κλωβούς, τα συστήματα ανακυκλοφορίας νερού, τα ολοκληρωμένα πολυτροφικά συστήματα και οι παρεμβάσεις επεξεργασίας ή ανάκτησης αποβλήτων. Η Ανάλυση Κύκλου Ζωής έχει αναδειχθεί ως ιδιαίτερα χρήσιμο εργαλείο για τέτοιες συγκρίσεις, καθώς μπορεί να αποτυπώσει όχι μόνο τις άμεσες τοπικές επιπτώσεις, αλλά και τις ανάντη και κατάντη επιβαρύνσεις της αλυσίδας παραγωγής, όπως οι ιχθυοτροφές, η ενέργεια και οι μεταφορές (Henriksson et al., 2012; Bohnes et al., 2018; Hala et al., 2024). Τρίτον, η εκτίμηση περιβαλλοντικών επιπτώσεων παρέχει τη βάση για τεκμηριωμένη λήψη αποφάσεων από επιχειρήσεις, ρυθμιστικές αρχές, τοπικές κοινωνίες και καταναλωτές, καθώς η ΕΠΕ έχει ως βασικό σκοπό να ενσωματώνει τις περιβαλλοντικές ανησυχίες από τα αρχικά στάδια σχεδιασμού και να ενισχύει τη διαφάνεια και τη συμμετοχή του κοινού στη διαδικασία αδειοδότησης (European Commission, 2021 .; European Parliament & Council of the European Union, 2014).

Στο πλαίσιο αυτό, το Κεφάλαιο αυτό εξετάζει τις βασικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις των υδατοκαλλιεργειών και στη συνέχεια αναλύει τις κυριότερες μεθόδους εκτίμησης και αξιολόγησης των επιπτώσεων. Η ανάλυση περιλαμβάνει τόσο παραδοσιακές προσεγγίσεις, όπως οι Μελέτες Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων, όσο και πιο ολοκληρωμένα εργαλεία, όπως η Ανάλυση Κύκλου Ζωής, η Πολυκριτηριακή Ανάλυση, τα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών, οι περιβαλλοντικοί δείκτες και η αξιολόγηση βιωσιμότητας κύκλου ζωής. Η λογική του κεφαλαίου είναι ότι η βιωσιμότητα δεν μπορεί να τεκμηριωθεί χωρίς συστηματική αξιολόγηση· και η αξιολόγηση δεν μπορεί να είναι ουσιαστική εάν δεν λαμβάνει υπόψη τόσο τις τοπικές όσο και τις συστημικές επιπτώσεις της παραγωγής. (Δεληπέτρος Δ., 2024)

2.2. Μέθοδοι Εκτίμησης Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων

Τα εργαλεία για την εκτίμηση περιβαλλοντικών επιπτώσεων περιλαμβάνουν: την Ανάλυση Κύκλου Ζωής, την Ανάλυση Κόστους-Οφέλους, τη μέθοδο της

Πολυκριτηριακής Ανάλυσης, τα Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών, Στατιστικά Εργαλεία και Τεχνικές καθώς και Περιβαλλοντικούς Δείκτες.

2.2.1. Μελέτες και Σκοπός Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων (Environmental Impact Assessment)

Σύμφωνα με την ισχύουσα νομοθεσία του ν.4014/2011 (209 ’Α/ 21-9-2011), όπως τροποποιήθηκε με τον ν.4042/2012, τον ν.4964/2022, τον ν.5037/2023, απαραίτητο βήμα κατά τη διαδικασία περιβαλλοντικής αδειοδότησης για την υλοποίηση νέων έργων ή τη μετεγκατάσταση υφιστάμενων έργων της κατηγορίας Α αποτελεί η εκπόνηση Μελέτης Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων (ΜΠΕ) (Ελαφρού Ε., & Λουράκη Χ., 2019). Για την εκπόνηση της ΜΠΕ, όλες οι διαθέσιμες και απαραίτητες πληροφορίες που απαιτούνται παρέχονται στον φορέα του έργου ή της δραστηριότητας, από τις δημόσιες αρχές. Το περιεχόμενο της Μελέτης Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων (ΜΠΕ) και τα συνοδευτικά έγγραφα των φακέλων ανάλογα με την κατηγορία του έργου καθορίζονται μέσω υπουργικής απόφασης (Παράρτημα ΙΙ του ν.4014/2011), όπως παρουσιάζονται στην Εικόνα 4. και περιλαμβάνουν τα εξής:

1) Τις επιτρεπόμενες χρήσεις γης,

2) Την περιγραφή της τοποθεσίας του έργου και των τεχνικών χαρακτηριστικών του σε όλα τα στάδια κατασκευής και λειτουργίας.

3) Την περιγραφή και αξιολόγηση όλων των εναλλακτικών επιλογών που εξετάστηκαν από τον φορέα του έργου, όσον αφορά τη θέση, το μέγεθος και την τεχνολογία τους, συμπεριλαμβανομένης της επιλογής να μην υλοποιηθεί το έργο (μηδενική επιλογή).

4) Την περιγραφή των στοιχείων του φυσικού και ανθρωπογενούς περιβάλλοντος που μπορεί να επηρεαστούν σημαντικά από το προτεινόμενο έργο ή δραστηριότητα.

5) Την περιγραφή, εκτίμηση και αξιολόγηση των πιθανών σημαντικών επιπτώσεων που το προτεινόμενο έργο ή δραστηριότητα μπορεί να έχει στο περιβάλλον.

6) Το σχέδιο περιβαλλοντικής διαχείρισης που θα εφαρμοστεί για να διασφαλίσει την αποτελεσματική προστασία του περιβάλλοντος και την υλοποίηση των προτεινόμενων μέτρων. (Ελαφρού Ε., & Λουράκη Χ., 2019). Αυτό θα περιλαμβάνει επίσης το προτεινόμενο πρόγραμμα παρακολούθησης στο οποίο συμπεριλαμβάνονται τα εξής:

- οι διάφορες παραμέτρους, τους δείκτες και τα στοιχεία του περιβάλλοντος που παρακολουθούνται,

- οι μέθοδοι που ακολουθήθηκαν, η τοποθεσία, η χρονική περίοδος και η συχνότητα καταγραφής,

- τα μέτρα εξασφάλισης της ποιότητας και της αξιοπιστίας των εκάστοτε καταγραφών,

- το χρονοδιάγραμμα ενημέρωσης του Ηλεκτρονικού Περιβαλλοντικού Μητρώου (ΗΠΜ), σύμφωνα με το άρθ.18 του ν.4014/2011.(Λιόρδος, 2014).

7) Μια τεχνική περίληψη των δεδομένων που περιέχονται στη Μελέτη Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων (ΜΠΕ).

8) Εξειδικευμένες μελέτες που ενδέχεται να πραγματοποιήθηκαν κατά τη διαδικασία του Προκαταρκτικού Προσδιορισμού Περιβαλλοντικών Απαιτήσεων (ΠΠΠΑ), εάν αυτή εφαρμόστηκε (Ελαφρού Ε., & Λουράκη Χ., 2019).

Η Εκτίμηση Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων (ΕΠΕ) είναι μια συστηματική διαδικασία

που έχει ως στόχο να προσδιορίσει τις επιπτώσεις στο φυσικό περιβάλλον, στον άνθρωπο και στην ευημερία του από έργα, δραστηριότητες, σχέδια και πολιτικές που

αναγνωρίζει τις μελλοντικές συνέπειες μιας υφιστάμενης ή προτεινόμενης ενέργειας.

Οι στόχοι της ΕΠΕ συνοψίζονται στα εξής:

- πληροφόρηση αναφορικά με τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις για τη διαδικασία λήψης αποφάσεων

- πρόβλεψη, προσδιορισμός και αξιολόγηση περιβαλλοντικών, οικονομικών και κοινωνικών επιπτώσεων,
- εφαρμογή βιώσιμων, καταλλήλων για το περιβάλλον πρακτικών μέσω του εντοπισμού αντίστοιχων επιλογών λύσεων και μέτρων ρύθμισης. (Λιόρδος, 2014)

Ο σκοπός της αξιολόγησης της ΕΠΕ είναι να ελεγχθεί η ποιότητα και η πληρότητα της μελέτης, να διασφαλιστεί η συμμόρφωση με τους αρχικούς όρους εντολής και με την ισχύουσα νομοθεσία, καθώς και να εκτιμηθεί η καταλληλόλητά της. Με άλλα λόγια, κατά πόσο μπορεί να υποστηριχθεί η λήψη απόφασης για την αδειοδότηση του έργου. Σε μια τέτοια αξιολόγηση, για να αποφασιστεί εάν ένα έργο ή μια δραστηριότητα έχει σημαντικές επιπτώσεις για το περιβάλλον, λαμβάνονται υπόψη, μεταξύ άλλων παραμέτρων, το μέγεθος, η διάρκεια επιρροής, η σοβαρότητα και η αλληλεπίδρασή τους.

Συγκεκριμένα, σκοπός της Εκτίμησης Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων (ΕΠΕ) είναι ο εντοπισμός, η ανάλυση και η αξιολόγηση των άμεσων και έμμεσων επιπτώσεων που μπορεί να επιφέρει μια δραστηριότητα ή ένα έργο στο περιβάλλον, συμπεριλαμβανομένων και πιθανών διασυνοριακών επιπτώσεων. Παράλληλα, η ΕΠΕ αποσκοπεί στη συγκριτική αξιολόγηση του εκάστοτε έργου ή δραστηριότητας σε σχέση με το μηδενικό σενάριο, δηλαδή την περίπτωση μη υλοποίησής του. Μέσα από τη διαδικασία αυτή καθορίζονται τα κατάλληλα μέτρα για την πρόληψη, τον περιορισμό ή την αντιμετώπιση της περιβαλλοντικής ρύπανσης και της πιθανής περιβαλλοντικής ζημίας. Επιπλέον, η ΕΠΕ συμβάλλει στη συγκέντρωση και αξιολόγηση των απαραίτητων επίσημων εγγράφων για την έκδοση αποφάσεων που αφορούν την άδεια λειτουργίας ενός έργου ή την τροποποίησή της, σύμφωνα με το ισχύον θεσμικό πλαίσιο. Ακόμη, υποστηρίζει τη διαδικασία λήψης αποφάσεων, δίνοντας έμφαση στην τεχνική αξιολόγηση των αναπτυξιακών έργων και, όπου απαιτείται, στην ανάλυση κόστους-οφέλους. Τέλος, σημαντικός στόχος της ΕΠΕ είναι η ενημέρωση των υπευθύνων λήψης αποφάσεων, των αρμόδιων ρυθμιστικών φορέων και του κοινού σχετικά με τις περιβαλλοντικές συνέπειες των έργων, ώστε να εξετάζονται πιθανές τροποποιήσεις και εναλλακτικά σενάρια που μπορούν να μειώσουν το κόστος κατασκευής, συντήρησης και περιβαλλοντικής προστασίας, αποτρέποντας παράλληλα την υποβάθμιση του περιβάλλοντος (Ευθυμιάδου, 2018).

2.2.2. Ανάλυση Κόστους- Οφέλους (Cost Benefit-Analysis)

Η ανάλυση κόστους-οφέλους (Cost-Benefit Analysis, CBA) χρησιμοποιείται από τις αρχές του 20ού αιώνα για να βοηθά τους χρήστες να κατανοήσουν εύκολα αν αξίζει να πραγματοποιηθεί μια επένδυση ή ένα έργο. (Ευθυμιάδου, 2018). Η ανάλυση κόστους οφέλους βασίζεται στην ιδέα ότι «προκειμένου να αποκτηθεί μια καθαρή παρούσα αξία (NPV), κατά την χρονική περίοδο (T) ετών το προεξοφλητικό επιτόκιο (x) εφαρμόζεται σε ταμειακές ροές (CF), », όπως παρουσιάζεται στην εξίσωση (1):

$$NPV = \sum_{t=1}^{T} \frac{CFt}{(1 + x)^{t-1}} \qquad (1)$$

Εάν μετά από υπολογισμούς στη μέθοδο κόστους-οφέλους, η καθαρή παρούσα αξία (NPV) αναδείξει πρόσημο θετικό, τότε το έργο είναι επικερδές. (Ελαφρού Ε., & Λουράκη Χ., 2019) Οι περιβαλλοντικές, οικονομικές, και κοινωνικές πτυχές της σύγχρονης πραγματικότητας οδήγησαν στη δημιουργία τριών τύπων ανάλυσης κόστους-οφέλους α) την περιβαλλοντική (environmental CBA ή eCBA) ανάλυση, την β) οικονομική (financial Cost Benefit Analysis ή fCBA) και γ) την κοινωνική (socialCBA ή sCBA). Από τη στιγμή που η eCBA περιλαμβάνει και οικονομικές παραμέτρους, τα αποτελέσματα μίας οικονομικής ανάλυσης (fCBA) είναι αναγκαίες για μια πιο ολοκληρωμένη ανάλυση. Δηλαδή οι παράμετροι eCBA, fCBA είναι αλληλεξαρτώμενες και τα αποτελέσματα της μίας, επηρεάζουν τα αποτελέσματα της άλλης. Με βάση αυτό 42 το σκεπτικό είναι αντιληπτό πως μία η ανάλυση κόστους - οφέλους θα είναι θετική αν και μόνο εάν τα οικονομικά οφέλη δεν προκαλούν υπερβολικές περιβαλλοντικές συνέπειες στο φυσικό και ανθρωπογενές περιβάλλον. Για αυτό το λόγο, υπάρχουν ορισμένοι βασικοί πυλώνες που πρέπει να συνυπολογιστούν: (i) (ii) (iii) (iv) (v) 3.3. το κεντρικό σημείο, η χρονική διάρκεια, η ανάγκη διαμόρφωσης ενός βασικού σεναρίου ο τρόπος διαχείρισης ζητημάτων σε αναγκών σε ανθρώπινο δυναμικό η θεώρηση της σπανιότητας ως θέμα πολιτικής, (Hoogmartens R., et al. 2014).

2.2.3. Μέθοδος Πολυκριτηριακής Ανάλυσης (Multi-Criteria Decision Analysis, MCDA)

Η μέθοδος πολυκριτηριακής ανάλυσης (Multi-Criteria Decision Analysis, MCDA) είναι ένα εργαλείο λήψης αποφάσεων που σχεδιάστηκε για να μειώσει τη σύγχυση που προκύπτει όταν εμπλέκονται πολλά και διαφορετικά κριτήρια σε συγκεκριμένες επιλογές. Αυτή η μέθοδος συνθέτει μεγάλο όγκο πληροφοριών, διατηρώντας ταυτόχρονα τους στόχους και τις προτιμήσεις του εκάστοτε λήπτη της απόφασης. (Ευθυμιάδου, 2018). Ο βασικός στόχος αυτών των τεχνικών είναι να υποστηρίξουν τους λήπτες αποφάσεων στη συνεπή και λογική διαχείριση ενός μεγάλου όγκου πολύπλοκων δεδομένων. Ο στόχος της διαδικασίας πολυκριτηριακής ανάλυσης είναι να υποστηρίζει τη διαδικασία λήψης αποφάσεων, παρέχοντας τις απαραίτητες πληροφορίες στον λήπτη των αποφάσεων. Ένα βασικό χαρακτηριστικό της πολυκριτηριακής ανάλυσης αποφάσεων είναι η υποκειμενικότητα της λύσης. Οι στόχοι της Πολυκριτηριακής Ανάλυσης Αποφάσεων, για την απόκτηση μιας καθαρής παρούσας αξίας (NPV), καθορίζονται απο την φύση των κριτηρίων και πόσο ανταγωνιστικά είναι αυτά μεταξύ τους, τη μοντελοποίηση των προτιμήσεων του λήπτη της απόφασης και την ανεύρεση ικανοποιητικών λύσεων. Οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται για την επιλογή της κατάλληλης μεθόδου είναι:

- η εσωτερική συνοχή και λογική ακρίβεια
- η διαφάνεια
- η ευχρηστία
- οι απαιτήσεις δεδομένων που συνάδουν με τη σημασία του εξεταζόμενου ζητήματος
- οι απαιτήσεις χρόνου και πόρων για την πραγματοποίηση της ανάλυσης
- η διαθεσιμότητα κάποιου λογισμικού. (Ελαφρού Ε., & Λουράκη Χ., 2019)

Η πρόκληση της επιλογής ανάμεσα σε εναλλακτικές σε μια πολυκριτηριακή αξιολόγηση δεν είναι απλή. Συνήθως, δεν υπάρχει μια απόλυτα κατάλληλη λύση, ούτε κάποια εναλλακτική που ξεπερνά τις υπόλοιπες. Τα διάφορα κριτήρια συγκρούονται μεταξύ τους, και συνεπώς είναι απαραίτητο να υπάρχουν συμβιβαστικές λύσεις πριν από την τελική απόφαση. Η πολυκριτηριακή ανάλυση βοηθά να αξιολογηθούν διάφορες εναλλακτικές λύσεις ή προτάσεις με βάση πολλαπλά κριτήρια και να επιλεγεί η βέλτιστη επιλογή βάσει των περιβαλλοντικών επιπτώσεων και άλλων σημαντικών παραμέτρων. (Janssen, R., 2001). Συνεπώς, η πολυκριτηριακή ανάλυση μπορεί να

ενσωματωθεί στην ΕΠΕ και να συμβάλει στην πληρέστερη και πιο ενημερωμένη διαδικασία λήψης αποφάσεων όσον αφορά το περιβάλλον.

2.2.4. Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών G.I.S. (Geographic Information Systems)

Τα Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών (ΣΓΠ), γνωστά και ως G.I.S. (Geographic Information Systems), είναι συστήματα διαχείρισης χωρικών δεδομένων και των μεταξύ τους σχέσεων. Είναι ψηφιακά συστήματα, που δέχονται, αποθηκεύουν, μετατρέπουν, αναλύουν και είναι ικανά να παρουσιάζουν, να ενσωματώσουν, αποθηκεύσουν, προσαρμόσουν, αναλύσουν και παρουσιάσουν γεωγραφικές 44 πληροφορίες (Ελαφρού Ε., & Λουράκη Χ., 2019). Εν γένει, ένα ΣΓΠ αποτελεί ένα εργαλείο, το οποίο δίνει τη δυνατότητα στους χρήστες του να αποτυπώσουν μια μορφή της πραγματικότητας, να διαμορφώσουν χωρικά δεδομένα (spatial data) ή περιγραφικά δεδομένα, να τα τροποποιήσουν καταλλήλως και να τα αποδώσουν σε αναλογικά μέσα (χάρτες και διαγράμματα) ή σε ψηφιακά μέσα (διαδραστικούς χάρτες, αρχεία χωρικών δεδομένων). Οι συνηθέστερες εφαρμογές ενός ΣΓΠ άπτονται σε περιβαλλοντικά θέματα και αντίστοιχα συστήματα γεωγραφικών πληροφοριών (GIS) αποτελούν μεταξύ άλλων βάσεις δεδομένων με ισχυρές χαρτογραφικές δυνατότητες και γι' αυτό το λόγο συσχετίζονται συχνά με τις περιβαλλοντικές μελέτες και με τις διαδικασίες εκτίμησης περιβαλλοντικών επιπτώσεων, με τρείς δυνατές προσεγγίσεις. Όπως αναφέρουν οι Ευθυμιάδου, (2018) και (Ελαφρού Ε. & Λουράκη Χ., 2019), η πρώτη εκ των οποίων αφορά στην παροχή χωρικών δεδομένων για την εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Αυτό μπορεί να περιέχει διάφορα επίπεδα πολυπλοκότητας για το ρόλο που παίζει το GIS:

- Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη χαρτογράφηση περιοχών, για την παροχή οπτικών εργαλείων (για παράδειγμα, χάρτες της περιοχής ενδιαφέροντος και περιοχών ευαισθησίας).
- Μπορεί να διαθέτει δεδομένα σε ένα εξωτερικό εργαλείο (κάνοντας κάποιο είδους "προεπεξεργασίας" των δεδομένων που αφορούν στο έργο και στο περιβάλλον του). Αυτό με τη σειρά του εξαρτάται από τη φύση της πολυπλοκότητάς του, και είναι:
- Ένα μοντέλο προσομοίωσης που προβλέπει συγκεκριμένες επιπτώσεις, όπως ένα μοντέλο πρόβλεψης θορύβου ή ένα μοντέλο διασποράς ρύπανσης.

- Ένα σύστημα εμπειρογνωμόνων ή άλλο εργαλείο υποστήριξης λήψης αποφάσεων που οδηγεί στην εκτίμηση των επιπτώσεών.
- Ένας συνδυασμός και των δύο. (Elsa João & Alexandra Fonseca, 2012)

Η δεύτερη προσέγγιση για την εκτίμηση περιβαλλοντικών επιπτώσεων περιλαμβάνει τη δυνατότητα να εφαρμοστεί μέσω ενός GIS. Αυτή η προσέγγιση μπορεί να παρουσιάζει διάφορα επίπεδα πολυπλοκότητας, ανάλογα με τις ανάγκες και τις προδιαγραφές του εκάστοτε έργου. Ο χρήστης μπορεί να χρησιμοποιήσει λειτουργίες όπως η δημιουργία "buffer" για να αναδείξει περιοχές που επικαλύπτονται με ευαίσθητα σημεία ή η εκτέλεση αναλύσεων τομέων ορατότητας. Με αυτόν τον τρόπο, επιτρέπεται η πιο εμπεριστατωμένη αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων πριν ληφθούν οι τελικές αποφάσεις. Επιπλέον, η εφαρμογή αυτών των λειτουργιών μπορεί να προγραμματιστεί εσωτερικά στο GIS μέσω υπορουτίνων, χρησιμοποιώντας κάποια μορφή γλώσσας προγραμματισμού. Αυτό επιτρέπει την αυτοματοποίηση ολόκληρης της διαδικασίας για να διευκολύνει τον χρήστη. Τέλος, η τρίτη προσέγγιση επισημαίνει ότι το GIS μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την απεικόνιση των αποτελεσμάτων της εκτίμησης περιβαλλοντικών επιπτώσεων, η οποία γίνεται με χρήση άλλων εργαλείων αξιολόγησης. Τα GIS εν γένει χρησιμοποιούνται για την ευελιξία τους και την υψηλή ποιότητα που προσφέρουν στην παρουσίαση πληροφοριών μέσω χαρτών. (Ελαφρού Ε., & Λουράκη Χ., 2019)

2.2.5. Περιβαλλοντικοί Δείκτες (Environmental Performance Index, EPI)

Οι Περιβαλλοντικοί Δείκτες ή Δείκτες Αειφορίας χρησιμοποιούνται για να υπολογίσουν τις περιβαλλοντικές επιδόσεις οποιουδήποτε συνόλου διεργασιών, είτε αυτό είναι ολόκληρος ο πλανήτης, μια περιοχή, μια χώρα ή ένας οργανισμός. Όσον αφορά στη χρήση των περιβαλλοντικών δεικτών, χρησιμοποιούνται για τους εξής λόγους:

1. Για να παρέχουν πληροφορίες σχετικά με περιβαλλοντικά θέματα, με σκοπό να αξιολογείται η σημασία τους από τους αρμόδιους φορείς.
2. Για να υποστηρίζουν τη ανάπτυξη και τον ορισμός προτεραιοτήτων, αναδεικνύοντας εκείνους τους παράγοντες-κλειδιά οι οποίοι επηρεάζουν το περιβάλλον,

3. Ως βασικό εργαλείο για την ενίσχυση της περιβαλλοντικής ευαισθητοποίησης του κοινού.

Η πλειοψηφία των δεικτών βασίζεται στη σχέση που διαμορφώνεται μεταξύ του ανθρώπινου και του περιβαλλοντικού συστήματος. Σύμφωνα με αυτό το σκεπτικό ανάλυσης, η οικονομική και κοινωνική ανάπτυξη ασκούν πίεση (Pressure) στο περιβάλλον, μεταβάλλοντας την κατάσταση (State) του. Αυτή η αλλαγή επηρεάζει την υγεία, τα οικοσυστήματα και τις πρώτες ύλες (Impact), προκαλώντας κοινωνικές αντιδράσεις (Response), οι οποίες είτε λειτουργούν ως κινητήριες δυνάμεις (Driving Forces), είτε επηρεάζουν άμεσα τις επιπτώσεις. (Ελαφρού Ε., & Λουράκη Χ., 2019)

Σύμφωνα με την Μιχαηλίδου Α. (2017) οι δείκτες διακρίνονται στις ακόλουθες ομάδες:

- Περιγραφικοί Δείκτες: Περιγράφουν την τρέχουσα κατάσταση σε σημαντικά περιβαλλοντικά ζητήματα, όπως η κλιματική αλλαγή, η ρύπανση και η διάθεση αποβλήτων, και χωρίζονται σε κινητήριες δυνάμεις, πιέσεις, κατάσταση, επιπτώσεις και ανάδραση.
- Δείκτες Επίδοσης: Σε αντίθεση με τους Περιγραφικούς Δείκτες, οι Δείκτες Επίδοσης μετρούν πόσο απέχει η τρέχουσα περιβαλλοντική κατάσταση από τον επιθυμητό στόχο. Αυτοί οι δείκτες μπορούν να σχετίζονται με διάφορες συνθήκες ή τιμές αναφοράς, όπως εθνικούς και διεθνείς στόχους ή επίπεδα αειφορίας.
- Δείκτες Αποδοτικότητας: Αυτοί οι δείκτες παρέχουν πληροφορίες για την αποτελεσματικότητα προϊόντων και διαδικασιών, λαμβάνοντας υπόψη τη χρήση πόρων, των ρυπογόνων εκπομπών και των αποβλήτων.
- Δείκτες Ευημερίας: Αυτοί οι δείκτες αξιολογούν τη συνολική περιβαλλοντική αειφορία, , παρόμοια με τον δείκτη αειφόρου οικονομικής ευημερίας (index of sustainable economic welfare) (Ελαφρού & Βαγιωνά , 2019).

2.2.6. Ανάλυση κύκλου ζωής (Life Cycle Assessment LCA)

Η Ανάλυση Κύκλου Ζωής (ΑΚΖ) (Life Cycle Analysis, LCA) είναι μια συστηματική και αναλυτική μέθοδος που βοηθά στην εκτίμηση, αναγνώριση και μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που αφορούν στον τον κύκλο ζωής ενός προϊόντος. Ένα προϊόν μπορεί να είναι οποιοδήποτε υλικό αγαθό, άυλο αγαθό ή υπηρεσία. Συνεπώς, η

ανάλυση καλύπτει όλο τον εύρος διαδικασιών που σχετίζονται με την παραγωγή ενός προϊόντος, γνωστό και ως από την " cradle to consumer ".

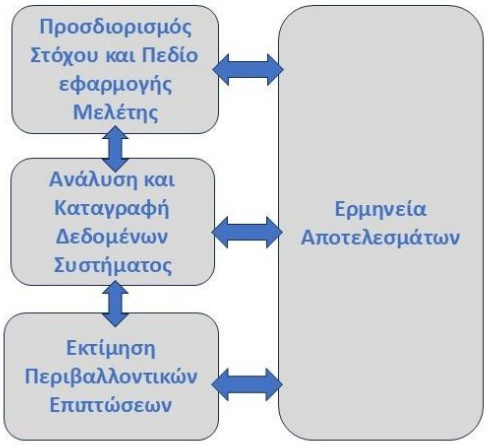
Ο ορισμός για την ΑΚΖ που έχει δοθεί από τη SETAC (Society for Environmental Toxicology and Chemistry, 1991), αναφέρει χαρακτηριστικά πως πρόκειται για «μια τεχνική εκτίμησης των περιβαλλοντικών επιβαρύνσεων που σχετίζονται με κάποιο προϊόν, διεργασία ή δραστηριότητα. Αυτή η τεχνική προσδιορίζει την ενέργεια και τα υλικά που χρησιμοποιούνται, καθώς και τα απόβλητα που απελευθερώνονται στο περιβάλλον. Εκτιμά τις επιπτώσεις από τη χρήση της ενέργειας και των υλικών, καθώς και των αποβλήτων, ενώ αναγνωρίζει και αξιολογεί τις δυνατότητες για περιβαλλοντικές βελτιώσεις».

Η συγκεκριμένη μέθοδος είναι η μόνη διεθνώς πιστοποιημένη μέθοδος εκτίμησης περιβαλλοντικών επιπτώσεων, σύμφωνα με τα Διεθνή Πρότυπα ISO 14040-43 (1997 2000) και τις αναθεωρήσεις τους ISO 14040-44 (2006). Η Ανάλυση Κύκλου Ζωής (κατά ISO) ορίζεται ως: «η συγκέντρωση και ο υπολογισμός των εισροών, εκροών και των περιβαλλοντικών επιπτώσεων ενός παραγωγικού συστήματος κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής του». Ο όρος "κύκλος ζωής" (κατά ISO) αναφέρεται «στα συνεχή και αλληλοεπιδρώντα στάδια ενός συστήματος παραγωγής, από την εξόρυξη και την επεξεργασία των πρώτων υλών έως την παραγωγή, μεταφορά, την επεξεργασία έως και την τελική αποσυναρμολόγηση του τελικού προϊόντος».

2.2.7. Μεθοδολογία Ανάλυσης Κύκλου Ζωής

Ο Διεθνής Οργανισμός Τυποποίησης (International Organization for Standardization - ISO (2006)) καθιέρωσε μια τυποποιημένη διαδικασία για τη διεξαγωγή αναλύσεων κύκλου ζωής. Σύμφωνα με τα πρότυπα ISO 14040-14044, κάθε μελέτη ΑΚΖ περιλαμβάνει τέσσερα κύρια στάδια-τίτλοι:

- Προσδιορισμός στόχου και του πεδίου εφαρμογής της μελέτης (goal and scope definition)
- Ανάλυση και καταγραφή δεδομένων για το σύστημα (inventory analysis)
- Εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων από τη λειτουργία του συστήματος (impact assessment)
- Ερμηνεία των αποτελεσμάτων (interpretation)



Εικόνα 2: *Στάδια Ανάλυσης Κύκλου Ζωής*

Αξίζει να σημειωθεί, πως τα διπλά βέλη στην Εικόνα 2 δηλώνουν ότι η ΑΚΖ είναι μια επαναληπτική διαδικασία. Κάθε ένα από τα στάδια της ανάλυσης, χρησιμοποιεί αποτελέσματα από τα υπόλοιπα στάδια. Για τον λόγο αυτό, κανένα από τα στάδια δεν λειτουργεί ανεξάρτητο από τα άλλα, πριν ολοκληρωθεί ολόκληρη η μελέτη. Για παράδειγμα, μπορεί αν χρειαστεί να προσαρμοστεί κατάλληλα ο στόχος και το πεδίο εφαρμογής της μελέτης αν διαπιστωθεί δυσκολία στη συλλογή των απαιτούμενων δεδομένων.

Η Ανάλυση Κύκλου Ζωής (ΑΚΖ) ακολουθεί συγκεκριμένα στάδια, τα οποία εξασφαλίζουν τη συστηματική αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων ενός προϊόντος, συστήματος ή υπηρεσίας. Αρχικά, πραγματοποιείται ο προσδιορισμός του στόχου και του πεδίου εφαρμογής της μελέτης, ο οποίος αποτελεί το πρώτο και βασικό στάδιο της ΑΚΖ. Σε αυτό καθορίζονται ο σκοπός της μελέτης, η προβλεπόμενη χρήση των αποτελεσμάτων, το κοινό στο οποίο απευθύνεται, καθώς και ο τρόπος αξιοποίησής τους. Παράλληλα, προσδιορίζονται το υπό εξέταση σύστημα, τα όρια του συστήματος, η λειτουργική μονάδα και οι διαδικασίες κατανομής. Το σύστημα προϊόντος περιλαμβάνει το σύνολο των διεργασιών που μετατρέπουν εισροές, όπως πρώτες ύλες και ενέργεια, σε εκροές, όπως προϊόντα, εκπομπές και απόβλητα. Τα όρια του

συστήματος καθορίζουν ποιες διεργασίες θα συμπεριληφθούν στη μελέτη. Η λειτουργική μονάδα αποτελεί τη βάση αναφοράς της ανάλυσης, καθώς συνδέει τη λειτουργία του συστήματος με τις εισροές και τις εκροές του. Τέλος, η κατανομή εφαρμόζεται όταν μία διεργασία παράγει περισσότερα από ένα προϊόντα ή παραπροϊόντα, με σκοπό την ορθότερη απόδοση των περιβαλλοντικών φορτίων, σύμφωνα με τις κατευθύνσεις του ISO 14044 (International Organization for Standardization, 2006; Petrillo et al., 2016).

Το δεύτερο στάδιο είναι η ανάλυση απογραφής δεδομένων. Σε αυτό ποσοτικοποιούνται όλες οι εισροές και εκροές του συστήματος, όπως η κατανάλωση ενέργειας, πρώτων υλών, νερού, καθώς και οι εκπομπές, τα απόβλητα και οι ρύποι που προκύπτουν σε κάθε διεργασία. Το αποτέλεσμα είναι ένας πίνακας απογραφής, ο οποίος αποτυπώνει τις περιβαλλοντικές ροές του συστήματος σε όλο τον κύκλο ζωής του. Η διαδικασία αυτή είναι επαναληπτική και μπορεί να επικαιροποιείται με νέα δεδομένα, αρκεί να παραμένει συνεπής με τον στόχο και το πεδίο εφαρμογής της μελέτης (Χαλεπλή, 2019; PRé Sustainability, 2016).

Ακολουθεί η εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, κατά την οποία τα δεδομένα της απογραφής μετατρέπονται σε δείκτες περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Το στάδιο αυτό επιτρέπει την αξιολόγηση της βαρύτητας και της σημασίας των δυνητικών επιπτώσεων του εξεταζόμενου συστήματος. Η διαδικασία περιλαμβάνει επιμέρους βήματα, όπως η ταξινόμηση, ο χαρακτηρισμός, η κανονικοποίηση, η ομαδοποίηση και η στάθμιση. Στην ταξινόμηση, οι εισροές και εκροές αντιστοιχίζονται σε κατηγορίες επιπτώσεων, όπως η ανθρώπινη υγεία, το περιβάλλον και η εξάντληση φυσικών πόρων. Στον χαρακτηρισμό, τα αποτελέσματα μετατρέπονται σε κοινές μονάδες και αθροίζονται ανά κατηγορία επίπτωσης. Η κανονικοποίηση συγκρίνει τα αποτελέσματα με τιμές αναφοράς, ενώ η ομαδοποίηση διευκολύνει την παρουσίαση και κατανόηση των αποτελεσμάτων. Τέλος, η στάθμιση επιτρέπει τη σύνθεση των επιμέρους επιπτώσεων σε συνολική βαθμολογία, αν και αποτελεί προαιρετικό και πιο υποκειμενικό στάδιο της ανάλυσης (PRé Sustainability, 2016).

Το τελικό στάδιο είναι η ερμηνεία των αποτελεσμάτων, όπου αναλύονται τα ευρήματα της μελέτης, εντοπίζονται τα σημαντικότερα περιβαλλοντικά σημεία επιβάρυνσης και αξιολογούνται οι περιορισμοί της ανάλυσης. Στο πλαίσιο αυτό μπορεί να πραγματοποιηθεί και ανάλυση ευαισθησίας, ώστε να διερευνηθεί πώς μεταβολές σε

δεδομένα, παραδοχές ή μεθόδους επηρεάζουν τα τελικά αποτελέσματα. Η παρουσίαση των αποτελεσμάτων πρέπει να είναι σαφής, τεκμηριωμένη και συνεπής με τον αρχικό στόχο της μελέτης (Κάλλης, 2018; PRé Sustainability, 2016).

Για την υποστήριξη της ΑΚΖ χρησιμοποιείται συχνά το λογισμικό SimaPro, το οποίο έχει αναπτυχθεί από την PRé Sustainability BV και αποτελεί ένα εξειδικευμένο εργαλείο για τη μοντελοποίηση συστημάτων και την ποσοτικοποίηση περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Η χρήση του είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς η συλλογή και επεξεργασία όλων των δεδομένων ενός κύκλου ζωής είναι σύνθετη και απαιτητική διαδικασία. Μέσω του SimaPro είναι δυνατή η ανάπτυξη ολόκληρου του κύκλου ζωής ενός προϊόντος ή μιας υπηρεσίας, η καταγραφή των εισροών και εκροών, η εφαρμογή μεθόδων εκτίμησης επιπτώσεων και η οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων. Αντίστοιχα με τα στάδια της ΑΚΖ, η χρήση του λογισμικού περιλαμβάνει τον καθορισμό στόχου και πεδίου μελέτης, την ανάλυση απογραφής, την αξιολόγηση επιπτώσεων και την ερμηνεία ή οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων (Goedkoop, 2008; Χαλεπλή, 2019· Κάλλης, 2018).

2.2. Βασικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις των υδατοκαλλιεργειών

Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις των υδατοκαλλιεργειών εξαρτώνται από τον τύπο του συστήματος εκτροφής, το καλλιεργούμενο είδος, την πυκνότητα παραγωγής, τη σύνθεση και διαχείριση της τροφής, τις πρακτικές υγιεινής και βιοασφάλειας, τις υδροδυναμικές συνθήκες της περιοχής και τη συνολική φέρουσα ικανότητα του οικοσυστήματος. Δεν είναι όλες οι μορφές υδατοκαλλιέργειας εξίσου επιβαρυντικές, ούτε όλες οι περιοχές εξίσου ευάλωτες. Μια μονάδα σε περιοχή με καλή ανανέωση νερού, επαρκές βάθος και ορθολογική διαχείριση τροφής μπορεί να έχει διαφορετικό περιβαλλοντικό προφίλ από μια μονάδα αντίστοιχης παραγωγής σε κλειστό κόλπο με χαμηλή κυκλοφορία υδάτων και υψηλή σωρευτική πίεση. Για τον λόγο αυτό, η περιβαλλοντική αξιολόγηση των υδατοκαλλιεργειών πρέπει να λαμβάνει υπόψη τόσο τα χαρακτηριστικά του παραγωγικού συστήματος όσο και τα οικολογικά και υδροδυναμικά χαρακτηριστικά της περιοχής εγκατάστασης (Martinez-Porchas & Martinez-Cordova, 2012; Ross et al., 2013; Bohnes et al., 2018).

Η πρώτη και συχνότερα αναφερόμενη επίπτωση είναι ο οργανικός εμπλουτισμός του θαλάσσιου περιβάλλοντος. Ο εμπλουτισμός σχετίζεται με την απόθεση οργανικών ουσιών που προέρχονται κυρίως από μη καταναλωθείσα τροφή, κόπρανα και μεταβολικά προϊόντα των εκτρεφόμενων οργανισμών. Η επίπτωση αυτή είναι κεντρική για τις θαλάσσιες ιχθυοκαλλιέργειες, διότι συνδέεται άμεσα με την ποσότητα τροφής που εισάγεται στο σύστημα και με την ικανότητα του περιβάλλοντος να διασπείρει ή να αποδομεί το οργανικό φορτίο. Η βιβλιογραφία για τις θαλάσσιες μονάδες έχει δείξει ότι η οργανική φόρτιση από τροφή και κόπρανα μπορεί να οδηγήσει σε μεταβολές των βιογεωχημικών διεργασιών, ευτροφισμό, μείωση οξυγόνου και αλλαγές στη δομή των βενθικών κοινοτήτων (Karakassis et al., 2000; Carroll et al., 2003; Tomassetti et al., 2016).

Ο ευτροφισμός αποτελεί μία από τις σημαντικότερες δυνητικές συνέπειες του οργανικού και θρεπτικού εμπλουτισμού. Η αυξημένη εισροή αζώτου και φωσφόρου μπορεί να ενισχύσει την πρωτογενή παραγωγικότητα, να μεταβάλει τη σύνθεση του φυτοπλαγκτού και, υπό ορισμένες συνθήκες, να οδηγήσει σε άνθηση μικροφυκών. Σε περιοχές με κακή ανανέωση υδάτων, η αποδόμηση της οργανικής ύλης μπορεί να προκαλέσει μείωση του διαλυμένου οξυγόνου και επιβάρυνση του βενθικού περιβάλλοντος. Η σοβαρότητα του φαινομένου εξαρτάται από το υδροδυναμικό καθεστώς, το βάθος, τη θερμοκρασία, τη βιολογική παραγωγικότητα της περιοχής και το επίπεδο παραγωγής της μονάδας (Pitta et al., 2006; Diaz & Rosenberg, 2008; Wang et al., 2013).

Στενά συνδεδεμένη με τον οργανικό εμπλουτισμό είναι η κατανάλωση οξυγόνου. Η αποδόμηση οργανικής ύλης από μικροοργανισμούς απαιτεί οξυγόνο, με αποτέλεσμα σε ορισμένες περιπτώσεις να μειώνεται η συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου στο νερό ή στα ιζήματα. Η μείωση αυτή μπορεί να επηρεάσει τόσο τους εκτρεφόμενους οργανισμούς όσο και τους άγριους πληθυσμούς και τις βενθικές κοινότητες. Η παρατήρηση αυτή αναδεικνύει τη σημασία της χωροθέτησης, καθώς το ίδιο οργανικό φορτίο μπορεί να έχει διαφορετικές συνέπειες ανάλογα με την κυκλοφορία και την ανανέωση των υδάτων (Hargrave et al., 1997; Karakassis et al., 2000; Diaz & Rosenberg, 2008).

Οι επιπτώσεις στα ιζήματα και στο βενθικό περιβάλλον αποτελούν επίσης κρίσιμη διάσταση. Στις πλωτές μονάδες ιχθυοκαλλιέργειας, μέρος της τροφής και των

κοπράνων καταλήγει στον πυθμένα, προκαλώντας αύξηση οργανικού άνθρακα, μεταβολή οξειδοαναγωγικών συνθηκών και αλλαγές στη σύνθεση των βενθικών οργανισμών. Η διεθνής βιβλιογραφία έχει δείξει ότι οι επιπτώσεις των θαλάσσιων κλωβών στο βενθικό περιβάλλον είναι έντονα χωρικά διαφοροποιημένες και εξαρτώνται από την ένταση παραγωγής, την ταχύτητα ρευμάτων, το βάθος, τα χαρακτηριστικά του υποστρώματος και τη διαχείριση της τροφής. Σε περιοχές με επαρκή υδροδυναμική ανανέωση, η διασπορά του οργανικού φορτίου μπορεί να περιορίζει την ένταση των τοπικών επιπτώσεων, ενώ σε κλειστούς κόλπους ή περιοχές χαμηλής κυκλοφορίας η συσσώρευση οργανικού υλικού μπορεί να οδηγήσει σε υποβάθμιση ιζημάτων και μείωση της βιοποικιλότητας του πυθμένα (Karakassis et al., 2000; Holmer et al., 2008; Tomassetti et al., 2016).

Μια δεύτερη κατηγορία επιπτώσεων αφορά τα αιωρούμενα σωματίδια και τη θόλωση του νερού. Τα σωματίδια αυτά μπορεί να προέρχονται από μη καταναλωθείσα τροφή, κόπρανα, οργανικά κατάλοιπα και δραστηριότητες χειρισμού των μονάδων. Η αύξηση αιωρούμενων στερεών μπορεί να επηρεάσει τη διαφάνεια του νερού, τη φωτοσύνθεση θαλάσσιων φυτών και μακροφυκών, καθώς και τους οργανισμούς που τρέφονται με διήθηση. Η επίπτωση αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική όταν συνδυάζεται με άλλες πιέσεις, όπως αυξημένη οργανική φόρτιση ή περιορισμένη ανανέωση των υδάτων (Martinez-Porchas & Martinez-Cordova, 2012; Carroll et al., 2003; Melaku et al., 2024).

Οι υδατοκαλλιέργειες μπορούν επίσης να αλληλεπιδράσουν με τη θαλάσσια τροφική αλυσίδα. Στην περίπτωση των οστρακοκαλλιεργειών, οι δίθυροι οργανισμοί διηθούν μεγάλες ποσότητες νερού και καταναλώνουν φυτοπλαγκτόν και οργανική ύλη. Σε ορισμένες περιπτώσεις, αυτό μπορεί να λειτουργήσει θετικά, μειώνοντας την υπερβολική οργανική ύλη ή βελτιώνοντας τη διαύγεια του νερού. Σε άλλες περιπτώσεις, όμως, η μεγάλη συγκέντρωση διηθηματοφάγων οργανισμών μπορεί να επηρεάσει τη διαθεσιμότητα φυτοπλαγκτού, να μεταβάλει τις σχέσεις μεταξύ πλαγκτονικών οργανισμών και να επηρεάσει τις βενθικές κοινότητες. Συνεπώς, οι επιπτώσεις δεν είναι μόνο χημικές ή φυσικές, αλλά και οικολογικές (Newell, 2004; Qi et al., 2021; Tan et al., 2024).

Ιδιαίτερη σημασία έχει η διαταραχή της άγριας πανίδας και των ενδιαιτημάτων. Οι μονάδες υδατοκαλλιέργειας μπορούν να επηρεάσουν την τοπική πανίδα μέσω αλλαγών

στη διαθεσιμότητα τροφής, έλξης άγριων ψαριών γύρω από τους κλωβούς, μεταβολής ενδιαιτημάτων, θορύβου, φωτισμού ή φυσικής παρουσίας των εγκαταστάσεων. Παράλληλα, η αγκυροβόληση και οι συνοδές εγκαταστάσεις μπορούν να προκαλέσουν τοπικές πιέσεις σε ευαίσθητους οικοτόπους, όπως λιβάδια θαλάσσιων φανερόγαμων. Η επίπτωση αυτή συνδέεται άμεσα με την επιλογή θέσης και αναδεικνύει γιατί η χωροθέτηση πρέπει να λαμβάνει υπόψη προστατευόμενες περιοχές, οικοτόπους προτεραιότητας και οικολογική ευαισθησία (Martinez-Porchas & Martinez-Cordova, 2012; Ross et al., 2013; Pergent-Martini et al., 2006).

Οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ εκτρεφόμενων και άγριων οργανισμών αποτελούν μία ακόμη κρίσιμη κατηγορία επιπτώσεων. Οι αλληλεπιδράσεις αυτές μπορεί να περιλαμβάνουν διαφυγές εκτρεφόμενων ψαριών, μετάδοση ασθενειών ή παρασίτων, ανταγωνισμό με άγριους πληθυσμούς και γενετική επιβάρυνση σε περιπτώσεις διασταύρωσης με συγγενικούς άγριους πληθυσμούς. Αν και η ένταση αυτών των επιπτώσεων εξαρτάται από το είδος, την περιοχή και το σύστημα εκτροφής, η πρόληψη διαφυγών και η βιοασφάλεια αποτελούν βασικές απαιτήσεις βιώσιμης διαχείρισης. Η διεθνής βιβλιογραφία έχει αναδείξει ότι οι διαφυγές εκτρεφόμενων ψαριών μπορούν να δημιουργήσουν οικολογικούς, γενετικούς και παθολογικούς κινδύνους για τους άγριους πληθυσμούς, ενώ στη Μεσόγειο το ζήτημα αφορά ιδιαίτερα είδη όπως η τσιπούρα και το λαβράκι (Naylor et al., 2005; Atalah & Sanchez-Jerez, 2020; Alvanou et al., 2023).

Η χρήση χημικών, φαρμακευτικών ουσιών και βιοενεργών ουσιών αποτελεί επίσης παράμετρο περιβαλλοντικού κινδύνου. Οι ουσίες αυτές μπορεί να χρησιμοποιούνται για την πρόληψη ή αντιμετώπιση ασθενειών, τον καθαρισμό εξοπλισμού ή τη διαχείριση των παραγωγικών συνθηκών. Η ανεπαρκής χρήση ή διαχείρισή τους μπορεί να οδηγήσει σε επιπτώσεις στο υδάτινο περιβάλλον, στους μικροοργανισμούς, στους μη-στόχους οργανισμούς ή ακόμη και στην ανάπτυξη ανθεκτικότητας. Για τον λόγο αυτό, η σύγχρονη βιώσιμη υδατοκαλλιέργεια δίνει έμφαση στην πρόληψη ασθενειών, στη βιοασφάλεια, στους εμβολιασμούς, στη μείωση της χρήσης αντιβιοτικών και στην αυστηρή παρακολούθηση φαρμακευτικών παρεμβάσεων (Cabello, 2006; Henriksson et al., 2017; Cherian et al., 2023).

Πέρα από τις άμεσες τοπικές επιπτώσεις, οι υδατοκαλλιέργειες προκαλούν και συστημικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις που συνδέονται με τον κύκλο ζωής του

προϊόντος. Η παραγωγή ιχθυοτροφών, η μεταφορά πρώτων υλών, η παραγωγή γόνου, η λειτουργία συστημάτων αερισμού ή άντλησης, η ψύξη, η συσκευασία, η μεταφορά και η διαχείριση αποβλήτων συμβάλλουν στο συνολικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα. Για αυτόν τον λόγο, οι επιπτώσεις των υδατοκαλλιεργειών δεν μπορούν να αποτιμηθούν πλήρως μόνο μέσω τοπικών δειγματοληψιών νερού και ιζημάτων. Απαιτείται συμπληρωματικά συστημική αξιολόγηση με μεθόδους όπως η Ανάλυση Κύκλου Ζωής, η οποία επιτρέπει την αποτίμηση των επιπτώσεων κατά μήκος της αλυσίδας παραγωγής και την αναγνώριση περιβαλλοντικών hotspot, όπως η τροφή και η ενέργεια (Henriksson et al., 2012; Bohnes et al., 2018; Ghamkhar et al., 2021).

Η διάκριση μεταξύ τοπικών και συστημικών επιπτώσεων είναι ιδιαίτερα σημαντική για τη διαμόρφωση πολιτικής. Οι τοπικές επιπτώσεις αντιμετωπίζονται κυρίως με κατάλληλη χωροθέτηση, φέρουσα ικανότητα, περιβαλλοντική παρακολούθηση, έλεγχο παραγωγικής έντασης και διαχείριση τροφής. Οι συστημικές επιπτώσεις απαιτούν εργαλεία όπως LCA, βελτίωση ιχθυοτροφών, ενεργειακή αποδοτικότητα, κυκλική οικονομία, ανάκτηση αποβλήτων και μείωση εκπομπών κατά μήκος της αλυσίδας αξίας. Επομένως, η αποτελεσματική περιβαλλοντική διαχείριση πρέπει να συνδυάζει χωροταξικά εργαλεία, τεχνολογικές παρεμβάσεις και μεθόδους αξιολόγησης κύκλου ζωής (FAO, 2010; Ross et al., 2013; Henriksson et al., 2012; Bohnes et al., 2018).

Συνολικά, οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις των υδατοκαλλιεργειών είναι σύνθετες, πολυπαραγοντικές και εξαρτώμενες από το πλαίσιο εφαρμογής. Δεν μπορούν να αντιμετωπιστούν με γενικευμένες αξιολογήσεις που χαρακτηρίζουν συνολικά τον κλάδο ως βιώσιμο ή μη βιώσιμο. Αντίθετα, απαιτείται ανάλυση ανά σύστημα εκτροφής, ανά είδος, ανά περιοχή, ανά τεχνολογία και ανά πρακτική διαχείρισης. Η ίδια δραστηριότητα μπορεί να έχει περιορισμένες επιπτώσεις όταν χωροθετείται σωστά, εφαρμόζει χαμηλές απώλειες τροφής, παρακολουθείται συστηματικά και ενσωματώνει τεχνολογίες επεξεργασίας αποβλήτων, αλλά μπορεί να δημιουργήσει σημαντική επιβάρυνση όταν αναπτύσσεται σε περιβαλλοντικά ευαίσθητες ή υδροδυναμικά ακατάλληλες περιοχές. Για τον λόγο αυτό, οι μέθοδοι εκτίμησης περιβαλλοντικών επιπτώσεων είναι απαραίτητες για τη συστηματική τεκμηρίωση, σύγκριση και διαχείριση των παραπάνω πιέσεων (Martinez-Porchas & Martinez-Cordova, 2012; Ross et al., 2013; Bohnes et al., 2018).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. Μελέτη Περίπτωσης : Ιχθυοκαλλιέργεια Τσιπούρας

3.1. Στόχος της Μελέτης

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποσκοπεί στην εφαρμογή της μεθοδολογίας Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (Life Cycle Assessment – LCA) σε μελέτη περίπτωσης μονάδας υδατοκαλλιέργειας στη Μεσόγειο, με αναφορά στην καλλιέργεια τσιπούρας (Sparus aurata), η οποία αποτελεί ένα από τα πλέον αντιπροσωπευτικά είδη της μεσογειακής υδατοκαλλιέργειας (Kallitsis et al. 2020 ; FAO , 2024). Ο τελικός στόχος είναι η διατύπωση τεκμηριωμένων, βασισμένων σε δεδομένα προτάσεων, οι οποίες θα υποστηρίζουν την ανάπτυξη περιβαλλοντικά υπεύθυνων συστημάτων παραγωγής, ευθυγραμμισμένων με τα ευρωπαϊκά και διεθνή πλαίσια βιωσιμότητας. Η προσέγγιση αυτή συνδέεται άμεσα με τους Στόχους Βιώσιμης Ανάπτυξης του ΟΗΕ και ειδικότερα με τον Στόχο 12 για την υπεύθυνη κατανάλωση και παραγωγή, τον Στόχο 13 για τη δράση για το κλίμα και τον Στόχο 14 για τη ζωή στο νερό. Η εφαρμογή της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής επιτρέπει την ποσοτική αποτύπωση των περιβαλλοντικών επιβαρύνσεων σε όλα τα στάδια της παραγωγικής αλυσίδας, συμβάλλοντας στον εντοπισμό κρίσιμων σημείων βελτίωσης. Με τον τρόπο αυτό, η μελέτη υποστηρίζει τη μετάβαση προς πιο αποδοτικά, χαμηλότερου περιβαλλοντικού αποτυπώματος και οικολογικά συμβατά συστήματα υδατοκαλλιέργειας.

Όσον αφορά το εθνικό θεσμικό πλαίσιο, η Ανάλυση Κύκλου Ζωής μπορεί να λειτουργήσει υποστηρικτικά προς τον παράκτιο και θαλάσσιο χωροταξικό σχεδιασμό, καθώς παρέχει ποσοτικά δεδομένα για τις περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις που συνδέονται με την παραγωγή υδατοκαλλιεργητικών προϊόντων. Στο πλαίσιο των Περιοχών Οργανωμένης Ανάπτυξης Υδατοκαλλιεργειών (ΠΟΑΥ), η ΑΚΖ μπορεί να ενισχύσει τη διαδικασία τεκμηριωμένης λήψης αποφάσεων, συμβάλλοντας στον εντοπισμό των κρίσιμων σταδίων της παραγωγικής αλυσίδας και στην αξιολόγηση εναλλακτικών πρακτικών με χαμηλότερο περιβαλλοντικό αποτύπωμα. Με τον τρόπο αυτό, μπορεί να λειτουργήσει συμπληρωματικά προς τα εργαλεία χωροθέτησης και περιβαλλοντικής αδειοδότησης, συμβάλλοντας τόσο στη μείωση των περιβαλλοντικών πιέσεων όσο και στην καλύτερη διαχείριση πιθανών συγκρούσεων χρήσεων στον παράκτιο χώρο.

Προς τον σκοπό αυτό, η μελέτη διαρθρώνεται γύρω από τους ακόλουθους ειδικούς στόχους:

α) Ποσοτικοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που συνδέονται με την καλλιέργεια τσιπούρας υπό πραγματικές συνθήκες λειτουργίας

Η μελέτη αυτή αξιολογεί πολλαπλές κατηγορίες περιβαλλοντικών επιπτώσεων, συμπεριλαμβανομένων του δυναμικού υπερθέρμανσης του πλανήτη (global warming potential - GWP), του ευτροφισμού, της οξίνισης, της χρήσης ενέργειας και της κατάληψης γης, μέσω μοντελοποίησης του παραγωγικού συστήματος όπως αυτό περιγράφεται στη Μελέτη Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων (Papargyris, 2024). Ιδιαίτερη έμφαση θα δοθεί στον εντοπισμό των βασικών συντελεστών που συμβάλλουν στις επιπτώσεις κύκλου ζωής, με ειδική προσοχή στη σύνθεση της ιχθυοτροφής, την κατανάλωση ενέργειας και τις εκπομπές θρεπτικών ουσιών. Ο στόχος αυτός ακολουθεί τις συστάσεις των Henriksson et al. (2012) και Pelletier and Tyedmers (2008) σχετικά με την ανάγκη διεύρυνσης της εμπειρικής βάσης της LCA στην υδατοκαλλιέργεια με δεδομένα προσαρμοσμένα σε συγκεκριμένες περιοχές.

β) Εντοπισμός βέλτιστων πρακτικών που μειώνουν τις περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις και βελτιώνουν την αποδοτικότητα των πόρων

Με βάση τα αποτελέσματα της LCA και την ανασκόπηση της τρέχουσας επιστημονικής βιβλιογραφίας, η μελέτη θα αξιολογήσει ένα εύρος τεχνικών και διαχειριστικών πρακτικών, όπως εναλλακτικές ιχθυοτροφές χαμηλού περιβαλλοντικού αποτυπώματος, ολοκληρωμένη πολυτροφική υδατοκαλλιέργεια (Integrated Multi-Trophic Aquaculture - IMTA) και συστήματα ψηφιακής παρακολούθησης. Στόχος είναι η παροχή εφαρμόσιμων συμπερασμάτων σχετικά με το πώς ο επανασχεδιασμός του συστήματος μπορεί να μειώσει τις εκπομπές και να βελτιώσει τη συγκράτηση θρεπτικών ουσιών, σύμφωνα με τα ευρήματα της διεθνούς βιβλιογραφίας (Bohnes et al., 2018; Wang et al., 2013; Aubin, 2024).

γ) Υποστήριξη της ανάπτυξης ενός τυποποιημένου πλαισίου LCA για τη μεσογειακή υδατοκαλλιέργεια, προς ενίσχυση της πολιτικής και των συστημάτων ιχνηλασιμότητας

Ο στόχος αυτός ευθυγραμμίζεται με ευρωπαϊκές στρατηγικές, όπως η Ατζέντα για τη Γαλάζια Ανάπτυξη, η Στρατηγική «Από το Αγρόκτημα στο Πιάτο» και η Στρατηγική της ΕΕ για τη Βιοποικιλότητα με ορίζοντα το 2030. Η προτεινόμενη μεθοδολογία LCA αποσκοπεί στο να είναι επεκτάσιμη και αναπαραγώγιμη, ώστε να μπορεί να υποστηρίξει μελλοντική έρευνα και προσπάθειες πιστοποίησης.

δ) Η βιωσιμότητα στις μονάδες ιχθυοκαλλιεργειών προκειμένου να υπηρετήσουν τους στόχους της Γαλάζιας Ανάπτυξης και των αντίστοιχων Στρατηγικών

3.2. Πεδίο Εφαρμογής και Περιορισμοί

Η μελέτη αυτή εφαρμόζει τη μεθοδολογία Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (LCA) για την αξιολόγηση της περιβαλλοντικής επίδοσης της καλλιέργειας τσιπούρας (Sparus aurata), εστιάζοντας σε σύστημα θαλάσσιας εκτροφής σε κλωβούς που βρίσκεται στην ανατολική Μεσόγειο. Η μοντελοποίηση πραγματοποιείται στο SimaPro με τη χρήση των μεθόδων ReCiPe 2016 και CML-IA, με δεδομένα απογραφής από τη βάση Ecoinvent v3.8 και πρωτογενή λειτουργικά δεδομένα (Papargyris, 2024). Η λειτουργική μονάδα ορίζεται ως ένα κιλό τσιπούρας ζωντανού βάρους που παράγεται. Όλα τα αποτελέσματα εκφράζονται με βάση αυτή τη μονάδα, ώστε να επιτρέπεται η σύγκριση μεταξύ συστημάτων και σεναρίων.

Τα όρια του συστήματος, η λειτουργική μονάδα και οι μέθοδοι κατανομής καθορίζονται σύμφωνα με τα πρότυπα ISO 14040/44 και τις βέλτιστες πρακτικές που παρουσιάζονται από τον Aubin (2024) και το ILCD Handbook (European Commission, 2010).

Η παρούσα Ανάλυση Κύκλου Ζωής υιοθετεί όρια συστήματος από την «κούνια έως την πύλη της μονάδας» (cradle-to-farm-gate) για την καλλιέργεια τσιπούρας, καλύπτοντας διεργασίες από την εξόρυξη/παραγωγή πρώτων υλών κατάλληλων για ιχθυοτροφές έως τη λειτουργία της μονάδας και την παράδοση στα πρώτα σημεία πώλησης. Περιλαμβάνονται: η παραγωγή και μεταφορά ιχθυοτροφής, η παραγωγή γόνου/νεαρών ιχθύων στο εκκολαπτήριο, η επιτόπια πάχυνση σε θαλάσσιους κλωβούς, οι εισροές ενέργειας και υλικών για υποδομές και συντήρηση, οι εκπομπές θρεπτικών ουσιών από μη καταναλωθείσα τροφή και απεκκρίσεις ψαριών, η εισερχόμενη εφοδιαστική αλυσίδα προς τη μονάδα, καθώς και η συσκευασία, η ψυχρή αποθήκευση και η μεταφορά ζωντανών ή επεξεργασμένων ψαριών προς την τοπική διανομή και τους

λιανεμπορικούς/σουπερμάρκετ προορισμούς. Τα στάδια μετά τη λιανική πώληση — χειρισμός από τον καταναλωτή, προετοιμασία και διαχείριση αποβλήτων στο τέλος του κύκλου ζωής— εξαιρούνται.

3.3. Μεθοδολογικό πλαίσιο

Η μοντελοποίηση πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του λογισμικού SimaPro, εφαρμόζοντας κατηγορίες επιπτώσεων βάσει των μεθόδων ReCiPe 2016 και CML-IA baseline 2001, καλύπτοντας το δυναμικό υπερθέρμανσης του πλανήτη (GWP), τον ευτροφισμό, την οξίνιση, τη σωρευτική ζήτηση ενέργειας και την κατάληψη γης. Τα δεδομένα απογραφής προήλθαν από τη βάση δεδομένων Ecoinvent v3.8, σε συνδυασμό με πρωτογενή δεδομένα της μονάδας που αντλήθηκαν από τη Μελέτη Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων (Papargyris, 2024) και ευθυγραμμίστηκαν με τη δομή δεδομένων και τις παραδοχές που περιγράφονται στο *SimaPro database manual Methods library* και στους Wernet et al. (2016).

Βασικοί περιορισμοί

α) Γεωγραφική και χρονική εξειδίκευση των δεδομένων

Τα ευρήματα αντικατοπτρίζουν μια συγκεκριμένη μελέτη περίπτωσης στην Ελλάδα και δεν μπορούν να γενικευθούν άμεσα σε όλες τις μεσογειακές μονάδες. Οι εποχικές διακυμάνσεις και οι παράγοντες που σχετίζονται με τη συγκεκριμένη θέση, όπως οι ρυθμοί ανανέωσης του νερού και η τοπική προμήθεια ιχθυοτροφών, μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά τις εκπομπές και τη χρήση πόρων (Bohnes et al., 2018).

β) Εξαίρεση κατάντη διεργασιών πέραν της πύλης της μονάδας

Τα όρια του συστήματος ολοκληρώνονται στην πύλη της μονάδας. Επομένως, οι επιπτώσεις από τη μεταφορά στην αγορά, την επεξεργασία των ψαριών, τη συσκευασία και την κατανάλωση εξαιρούνται. Αν και αυτό απλοποιεί την ανάλυση και εστιάζει στην παραγωγή, μπορεί να υποεκτιμά το πλήρες περιβαλλοντικό αποτύπωμα κατά μήκος της αλυσίδας αξίας (Pelletier & Tyedmers, 2008).

γ) Περιορισμένη ενσωμάτωση οικονομικών και κοινωνικών συνιστωσών LCA

Παρότι η μελέτη εστιάζει κυρίως στην περιβαλλοντική επίδοση, περιλαμβάνει επίσης μια βασική Ανάλυση Κόστους Κύκλου Ζωής (Life Cycle Costing - LCC) και Κοινωνική Ανάλυση Κύκλου Ζωής (Social Life Cycle Assessment - S-LCA) για λόγους πληρότητας. Οι αναλύσεις αυτές πραγματοποιήθηκαν με εργαλεία βασισμένα στο Excel και βιβλιογραφική ανάλυση, και όχι με εξειδικευμένες πλατφόρμες λογισμικού, όπως το SimaPro ή το OpenLCA. Συνεπώς, το βάθος, η λεπτομέρεια και η μεθοδολογική τους αυστηρότητα δεν είναι ισοδύναμα με την περιβαλλοντική LCA. Παρ' όλα αυτά, παρέχουν χρήσιμες ποιοτικές και ημι-ποσοτικές πληροφορίες που συμπληρώνουν τα βασικά ευρήματα.

δ) Παραδοχές μοντελοποίησης και επιλογές κατανομής / Επιλογές κατανομής για τα συμπαραγόμενα της ιχθυοτροφής

Η κατανομή των συμπαραγόμενων για τα συστατικά της ιχθυοτροφής ακολουθεί το ακαθάριστο ενεργειακό περιεχόμενο ως κριτήριο κατανομής, σύμφωνα με προηγούμενες μελέτες (Pelletier et al., 2009). Ωστόσο, διαφορετικές επιλογές κατανομής, όπως η οικονομική αξία, θα μπορούσαν να μεταβάλουν τη σχετική κατανομή των επιπτώσεων, ιδιαίτερα για τις εισροές ιχθυάλευρου και ιχθυελαίου.

ε) Αβεβαιότητα και αντιπροσωπευτικότητα δεδομένων

Παρότι η μελέτη αξιοποιεί δεδομένα συγκεκριμένης μονάδας όπου αυτά είναι διαθέσιμα, τα δεδομένα υποβάθρου, όπως εκείνα που αφορούν την παραγωγή ιχθυοτροφών, βασίζονται εν μέρει σε παγκόσμιους μέσους όρους δεδομένων, για παράδειγμα από τη βάση Ecoinvent, οι οποίοι ενδέχεται να μην αντανακλούν τα χαρακτηριστικά της μεσογειακής βιομηχανίας ιχθυοτροφών. Οι αναλύσεις ευαισθησίας μπορούν να αντιμετωπίσουν εν μέρει αυτή την αβεβαιότητα, αλλά δεν την εξαλείφουν πλήρως.

στ) Χρήση δευτερογενών δεδομένων όπου δεν ήταν διαθέσιμα πρωτογενή λειτουργικά δεδομένα

Ορισμένες παραγωγικές διεργασίες —ιδίως η μεταφορά ιχθυοτροφών, οι εργατοώρες συσκευασίας, η τοπική διανομή και ορισμένα δεδομένα συντήρησης υποδομών— δεν διέθεταν ακριβείς λειτουργικές τιμές. Για την κάλυψη αυτών των κενών, χρησιμοποιήθηκαν τιμές παραμέτρων και συντελεστές εκπομπών από τη διεθνή βιβλιογραφία, οι οποίοι προσαρμόστηκαν κατάλληλα στην περίπτωση της εκτροφής

τσιπούρας. Για παράδειγμα, οι τιμές απέκκρισης φωσφόρου που προέρχονται από συστήματα πέστροφας (Milián-Sorribes et al., 2021) προσαρμόστηκαν με βάση γνωστές μεταβολικές διαφορές. Όλες αυτές οι παραδοχές μοντελοποίησης και οι μετασχηματισμοί των εισροών παρουσιάζονται αναλυτικά στο επόμενο κεφάλαιο.

3.4. Μεθοδολογικό Πλαίσιο

3.4.1. Επισκόπηση της Αξιολόγησης Βιωσιμότητας Κύκλου Ζωής (LCSA)

Η Αξιολόγηση Βιωσιμότητας Κύκλου Ζωής (Life Cycle Sustainability Assessment - LCSA) αποτελεί ένα ολοκληρωμένο μεθοδολογικό πλαίσιο για την αξιολόγηση της βιωσιμότητας προϊόντων και διεργασιών, μέσω της ενσωμάτωσης περιβαλλοντικών, οικονομικών και κοινωνικών διαστάσεων σε όλο τον κύκλο ζωής. Προερχόμενη από το καθιερωμένο πλαίσιο της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (Life Cycle Assessment - LCA) σύμφωνα με τα πρότυπα ISO 14040/44, η LCSA επεκτείνει το παραδοσιακό πεδίο εφαρμογής μέσω της ενσωμάτωσης της Ανάλυσης Κόστους Κύκλου Ζωής (Life Cycle Costing - LCC) και της Κοινωνικής Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (Social Life Cycle Assessment - S-LCA), επιτρέποντας έτσι μια πολυκριτηριακή αξιολόγηση ευθυγραμμισμένη με τους Στόχους Βιώσιμης Ανάπτυξης του ΟΗΕ (Guinée et al., 2011).

Στον πυρήνα της, η LCA ποσοτικοποιεί περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις, όπως οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, ο ευτροφισμός και η εξάντληση πόρων, σε όλα τα στάδια ζωής ενός προϊόντος, από την εξόρυξη πρώτων υλών έως το τέλος του κύκλου ζωής. Στο πλαίσιο της υδατοκαλλιέργειας, η LCA έχει αποδειχθεί απαραίτητη για τον εντοπισμό κρίσιμων σημείων επιβάρυνσης, όπως η παραγωγή ιχθυοτροφών και οι εκπομπές θρεπτικών ουσιών, επιτρέποντας τη λήψη τεκμηριωμένων αποφάσεων σχετικά με τον επανασχεδιασμό και την καινοτομία των συστημάτων (Henriksson et al., 2012; Pelletier & Tyedmers, 2009). Για παράδειγμα, μελέτες σε συστήματα εκτροφής σολομού και τιλάπιας έχουν δείξει ότι η τροφή μπορεί να συμβάλλει έως και στο 90% των συνολικών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, γεγονός που υποδεικνύει ότι οι βελτιωμένες στρατηγικές διατροφής θα μπορούσαν να μειώσουν δραστικά τα περιβαλλοντικά αποτυπώματα (Bohnes et al., 2018).

Η LCSA ενισχύει αυτή την προσέγγιση εξετάζοντας την οικονομική επίδοση ενός συστήματος μέσω της LCC, η οποία αξιολογεί όλα τα κόστη κύκλου ζωής από την

οπτική ενός ενδιαφερόμενου μέρους, καθώς και τις κοινωνικές επιπτώσεις μέσω της S-LCA, η οποία αξιολογεί δείκτες όπως τα εργασιακά δικαιώματα, οι επιπτώσεις στις τοπικές κοινωνίες και η διακυβέρνηση. Μαζί, αυτοί οι τρεις πυλώνες παρέχουν μια ισορροπημένη εικόνα της βιωσιμότητας, η οποία είναι ιδιαίτερα κρίσιμη σε σύνθετα συστήματα τροφίμων, όπως η υδατοκαλλιέργεια.

3.4.2. Ενσωμάτωση LCA, LCC και S-LCA

Στο πλαίσιο της επιστήμης της βιωσιμότητας, η μεμονωμένη εφαρμογή της περιβαλλοντικής LCA δεν επαρκεί πλέον για να αποτυπώσει την πλήρη πολυπλοκότητα κοινωνικο-οικολογικών συστημάτων όπως η υδατοκαλλιέργεια. Για τον λόγο αυτό, η παρούσα μελέτη υιοθετεί μια προσέγγιση Αξιολόγησης Βιωσιμότητας Κύκλου Ζωής (LCSA), ενσωματώνοντας τρία συμπληρωματικά εργαλεία: Περιβαλλοντική Ανάλυση Κύκλου Ζωής (LCA), Ανάλυση Κόστους Κύκλου Ζωής (LCC) και Κοινωνική Ανάλυση Κύκλου Ζωής (S-LCA). Το ενσωματωμένο αυτό πλαίσιο επιτρέπει μια ολοκληρωμένη αξιολόγηση της υδατοκαλλιέργειας τσιπούρας, εξετάζοντας από κοινού τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις, την οικονομική επίδοση και τις κοινωνικές προεκτάσεις της. Με τον τρόπο αυτό, ευθυγραμμίζεται με την προσέγγιση της Life Cycle Sustainability Assessment (LCSA) που εισήχθη από τους Guinée et al. (2011) και στη συνέχεια υποστηρίχθηκε από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή (Sala et al., 2013), διασφαλίζοντας ότι η βιωσιμότητα αξιολογείται με ισορροπημένο και συστηματικό τρόπο και στους τρεις πυλώνες.

3.4.2.1. Περιβαλλοντική LCA

Η περιβαλλοντική διάσταση αξιολογείται με τη χρήση της πλατφόρμας λογισμικού SimaPro (v9.5), εφαρμόζοντας τη βάση δεδομένων Ecoinvent 3.8 «allocation at cut-off by classification» και χαρακτηρισμό επιπτώσεων μέσω της μεθόδου CML-IA baseline. Οι κατηγορίες επιπτώσεων που περιλαμβάνονται είναι:

- ✓ Δυναμικό υπερθέρμανσης του πλανήτη (GWP)
- ✓ Θαλάσσιος και γλυκού νερού ευτροφισμός
- ✓ Δυναμικό οξίνισης
- ✓ Σωρευτική ζήτηση ενέργειας
- ✓ Κατάληψη γης

Η παρούσα LCA εφαρμόζει μια attributional προσέγγιση μοντελοποίησης σύμφωνα με τα πρότυπα ISO 14040/44. Όλες οι ροές υλικών και ενέργειας εκφράστηκαν ανά λειτουργική μονάδα 1 κιλού τσιπούρας ζωντανού βάρους που παραδίδεται στη λιανική αγορά. Η αξιολόγηση εστιάζει ιδιαίτερα στις εκπομπές που προκύπτουν από την παραγωγή ιχθυοτροφών, τη χρήση ορυκτής ενέργειας και τις εκροές θρεπτικών ουσιών, καθώς αυτά αναγνωρίζονται σταθερά ως τα κύρια περιβαλλοντικά κρίσιμα σημεία στη μεσογειακή υδατοκαλλιέργεια (Pelletier & Tyedmers, 2009; Bohnes et al., 2018).

3.4.2.2. Ανάλυση Κόστους Κύκλου Ζωής (LCC)

Η οικονομική διάσταση εξετάζεται μέσω ενός απλοποιημένου μοντέλου LCC που αναπτύχθηκε στο Microsoft Excel, βασισμένου σε συνδυασμό εκτιμήσεων συγκεκριμένων για τη μονάδα, όπως Papargyris (2024), και τιμών που αντλήθηκαν από τη διεθνή βιβλιογραφία. Οι κατηγορίες κόστους που εξετάζονται περιλαμβάνουν:

- ✓ Κεφαλαιουχική επένδυση, όπως κλωβοί, σκάφη και εξοπλισμός
- ✓ Μεταβλητά λειτουργικά κόστη, όπως τροφή, ενέργεια και εργασία
- ✓ Συντήρηση και αποσβέσεις
- ✓ Εφοδιαστική αλυσίδα και μεταφορές
- ✓ Ρυθμιστικά τέλη και τέλη πιστοποίησης

Λόγω της απουσίας εξειδικευμένου λογισμικού LCC κατάλληλου για εφαρμογές υδατοκαλλιέργειας, η οικονομική αξιολόγηση πραγματοποιείται με χρήση ντετερμινιστικής μοντελοποίησης κόστους σε συνδυασμό με συγκριτική αξιολόγηση μεταξύ παραγωγικών συστημάτων. Παρότι η προσέγγιση αυτή δεν επιτρέπει δυναμική προσομοίωση σεναρίων, επιτρέπει τον διαφανή εντοπισμό των βασικών οδηγών κόστους και των κύριων οικονομικών αντισταθμίσεων στα στάδια του κύκλου ζωής. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι δαπάνες για τροφή αντιστοιχούν περίπου στο 60-70% του συνολικού κόστους παραγωγής, υπογραμμίζοντας το σημαντικό δυναμικό της βελτιστοποίησης της σύνθεσης της ιχθυοτροφής και της στρατηγικής σίτισης για ταυτόχρονη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων και βελτίωση της οικονομικής επίδοσης (Henriksson et al., 2012; Bohnes et al., 2018).

3.4.2.3. Κοινωνική Ανάλυση Κύκλου Ζωής (S-LCA)

Η κοινωνική διάσταση αξιολογήθηκε με τη χρήση ενός ημι-ποιοτικού πλαισίου Κοινωνικής Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (S-LCA), ευθυγραμμισμένου με τις Κατευθυντήριες Οδηγίες του UNEP (2009) και εφαρμοσμένου μέσω δομημένης

βαθμολόγησης σε Excel. Οι ομάδες ενδιαφερόμενων μερών που εξετάστηκαν στην αξιολόγηση περιλαμβάνουν:

- ✓ Εργαζόμενοι: επαγγελματική υγεία και ασφάλεια, συνθήκες εργασίας, όπως ωράρια και συμβάσεις, σταθερότητα απασχόλησης
- ✓ Τοπικές κοινότητες: πρόσβαση σε φυσικούς πόρους, πιθανότητα κοινωνικών ή περιβαλλοντικών συγκρούσεων, συμβολή στην τοπική οικονομική ανάπτυξη
- ✓ Καταναλωτές: διαθεσιμότητα βιώσιμων επιλογών θαλασσινών, ιχνηλασιμότητα και διαφάνεια προϊόντος.

Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει τη συστηματική σύγκριση της κοινωνικής επίδοσης στα στάδια του κύκλου ζωής, παραμένοντας ταυτόχρονα ευαίσθητη στις ειδικές συνθήκες του μεσογειακού πλαισίου της υδατοκαλλιέργειας.

Η επιλογή των κοινωνικών δεικτών βασίστηκε τόσο στην ευρύτερη βιβλιογραφία της βιωσιμότητας (Sala et al., 2013) όσο και στο συγκεκριμένο ρυθμιστικό και κοινωνικοοικονομικό πλαίσιο της ελληνικής υδατοκαλλιέργειας, καθώς και στη χαρτογράφηση ενδιαφερόμενων μερών που πραγματοποιήθηκε για την παρούσα μελέτη. Για παράδειγμα, ενώ η υδατοκαλλιέργεια παρέχει σημαντικές ευκαιρίες απασχόλησης σε αγροτικές παράκτιες περιοχές, εθνικές αξιολογήσεις έχουν αναδείξει κενά στην εκπαίδευση των εργαζομένων και στα πρότυπα επαγγελματικής ασφάλειας, υποδεικνύοντας περιθώρια βελτίωσης στην ανάπτυξη δεξιοτήτων και στη διαχείριση κινδύνου. Το εξελισσόμενο αυτό πλαίσιο υπογραμμίζει τη σημασία της ευθυγράμμισης των παραγωγικών πρακτικών τόσο με τις ανάγκες των τοπικών κοινοτήτων όσο και με τις απαιτήσεις της αγοράς για διαφάνεια.

Δεδομένης της απουσίας πρωτογενών δεδομένων από έρευνες πεδίου, τα αποτελέσματα της S-LCA πρέπει να ερμηνεύονται ως διερευνητικά. Παρ' όλα αυτά, η ενσωμάτωσή τους είναι συνεπής με το πλαίσιο LCSA της Ευρωπαϊκής Επιτροπής, το οποίο δίνει έμφαση στην ολοκληρωμένη και όχι απομονωμένη εξέταση των περιβαλλοντικών, οικονομικών και κοινωνικών διαστάσεων στη λήψη αποφάσεων βιωσιμότητας (Sala et al., 2013).

Συνολικά, η συνδυασμένη χρήση LCA, LCC και S-LCA παρέχει μια πιο ολοκληρωμένη κατανόηση του συστήματος υδατοκαλλιέργειας τσιπούρας, εντοπίζοντας ταυτόχρονα περιβαλλοντικά κρίσιμα σημεία, βασικούς οικονομικούς οδηγούς κόστους και πεδία κοινωνικής σημασίας. Παρότι τα στοιχεία της LCC και της

S-LCA είναι αναγκαστικά λιγότερο λεπτομερή λόγω περιορισμών μοντελοποίησης και δεδομένων, εξακολουθούν να παρέχουν ουσιαστικές πληροφορίες που υποστηρίζουν τη διαφανή συγκριτική αξιολόγηση βιωσιμότητας και διευκολύνουν τη στρατηγική ευθυγράμμιση με τις προτεραιότητες της Ευρωπαϊκής Πράσινης Συμφωνίας και της στρατηγικής «Από το Αγρόκτημα στο Πιάτο».

3.5. Μελέτη Περίπτωσης: Υδατοκαλλιέργεια Τσιπούρας

Η παρούσα μελέτη περίπτωσης εξετάζει μια αντιπροσωπευτική μονάδα θαλάσσιας υδατοκαλλιέργειας στην ανατολική Μεσόγειο όπως προαναφέρθηκε, η οποία βρίσκεται στην Αργολίδα, στο βορειοανατολικό τμήμα της Πελοποννήσου, Ελλάδα, και είναι αφιερωμένη στην παραγωγή τσιπούρας (*Sparus aurata*), ενός είδους με σημαντική οικονομική και διατροφική αξία στη Νότια Ευρώπη. Το παρόν κεφάλαιο περιγράφει ολόκληρη τη διαδικασία της παραγωγικής μονάδας.

3.5.1 Λειτουργική Περιγραφή της Μονάδας

Η μονάδα ακολουθεί έναν ετήσιο κύκλο παραγωγής, χρησιμοποιώντας πλωτά συστήματα δικτυωτών κλωβών αγκυροβολημένα σε παράκτια θαλάσσια ύδατα, με τυπική διάρκεια εκτροφής 18-22 μήνες. Η ακριβής περίοδος πάχυνσης επηρεάζεται από παράγοντες που σχετίζονται με τη συγκεκριμένη θέση, όπως η εποχική θερμοκρασία του νερού, η σύνθεση και διαχείριση της τροφής και η πυκνότητα εκτροφής, οι οποίοι διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στον καθορισμό της ανάπτυξης και της αποδοτικότητας χρήσης πόρων.

Τα νεαρά ψάρια προέρχονται από πιστοποιημένα εκκολαπτήρια και μεταφέρονται στο θαλάσσιο σύστημα πάχυνσης στο στάδιο του ιχθυδίου. Ο κύκλος παραγωγής βασίζεται σε σύνθετες ιχθυοτροφές που διαμορφώνονται από μείγμα συστατικών θαλάσσιας προέλευσης, όπως ιχθυάλευρο και ιχθυέλαιο, και χερσαίων φυτικών πρωτεϊνών, όπως σογιάλευρο, γλουτένη σίτου και πρωτεΐνη καλαμποκιού. Οι συνθέσεις αυτές αποσκοπούν στην υποστήριξη αποδοτικής ανάπτυξης και ευνοϊκής επίδοσης μετατρεψιμότητας της τροφής· ωστόσο, αναγνωρίζονται ευρέως ως βασικοί συντελεστές περιβαλλοντικών επιπτώσεων στις αλυσίδες εφοδιασμού της υδατοκαλλιέργειας, κυρίως λόγω της αλλαγής χρήσεων γης, της εξόρυξης πόρων και των σχετικών εκπομπών που συνδέονται με την παραγωγή των συστατικών της τροφής (Bohnes et al., 2018; Milián-Sorribes et al., 2021).

Η υποδομή της μονάδας περιλαμβάνει αυτοματοποιημένες φορτηγίδες σίτισης, συστήματα καθαρισμού διχτυών και αντιρρυπαντικές πρακτικές, καθώς και επιτόπια παρακολούθηση βασικών παραμέτρων ποιότητας νερού, όπως το διαλυμένο οξυγόνο, η θερμοκρασία και η θολότητα. Η λειτουργική ενεργειακή ζήτηση καλύπτεται κυρίως από γεννήτριες που λειτουργούν με ορυκτά καύσιμα, αν και πρόσφατη έρευνα δείχνει ότι η μετάβαση σε συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας θα μπορούσε να μειώσει σημαντικά τις σχετικές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου (Aubin, 2024). Οι θνησιμότητες ψαριών συλλέγονται και διαχειρίζονται σύμφωνα με τους κανονισμούς κτηνιατρικής υγείας και διάθεσης αποβλήτων. Παράλληλα, τα απόβλητα της μονάδας, συμπεριλαμβανομένης της μη καταναλωθείσας τροφής και των μεταβολικών αποβλήτων, απελευθερώνονται απευθείας στα γύρω θαλάσσια ύδατα, συμβάλλοντας σε τοπική φόρτιση θρεπτικών ουσιών και πιθανές οικολογικές επιπτώσεις.

Τα ψάρια που συγκομίζονται είτε μεταφέρονται σε χερσαίες εγκαταστάσεις επεξεργασίας είτε διανέμονται απευθείας σε χονδρεμπόρους και σούπερ μάρκετ μέσω ψυχόμενης μεταφοράς, διασφαλίζοντας τη συμμόρφωση με τις απαιτήσεις της ψυχρής εφοδιαστικής αλυσίδας. Η μονάδα προμηθεύει τόσο την εγχώρια ελληνική αγορά όσο και εξαγωγικούς προορισμούς της ΕΕ, λειτουργώντας σύμφωνα με τις διατάξεις ιχνηλασιμότητας και ασφάλειας τροφίμων που θεσπίζονται στον Κανονισμό (ΕΚ) αριθ. 178/2002.

3.5.2. Λειτουργική Μονάδα και Όρια Συστήματος

Ένα θεμελιώδες στοιχείο της μοντελοποίησης κύκλου ζωής είναι ο ορισμός της λειτουργικής μονάδας, η οποία παρέχει τη βάση αναφοράς για την ποσοτικοποίηση των ροών υλικών και ενέργειας και για τη σύγκριση περιβαλλοντικών επιπτώσεων μεταξύ παραγωγικών σεναρίων. Στην παρούσα μελέτη, η λειτουργική μονάδα ορίζεται ως:

«Ένα μετρικό κιλό (1 kg) τσιπούρας ζωντανού βάρους που παραδίδεται για διανομή σούπερ μάρκετ.»

Η επιλογή αυτή ευθυγραμμίζεται με την καθιερωμένη πρακτική της LCA στην υδατοκαλλιέργεια, όπου οι λειτουργικές μονάδες εκφράζονται συνήθως ως ζωντανό βάρος, βάρος σφαγής ή βρώσιμη απόδοση, ανάλογα με τη διαθεσιμότητα δεδομένων και τους στόχους της μελέτης (Henriksson et al., 2012; Pelletier & Tyedmers, 2009). Καθορίζοντας τη μονάδα ως ζωντανό βάρος στο σημείο λιανικής διανομής, τα όρια του συστήματος περιλαμβάνουν την κατάντη εφοδιαστική αλυσίδα και τον χειρισμό,

ενισχύοντας έτσι τη συγκρισιμότητα των αποτελεσμάτων με ευρύτερες αξιολογήσεις βιωσιμότητας της αλυσίδας εφοδιασμού τροφίμων.

Τα όρια του συστήματος ορίζονται σύμφωνα με μια προοπτική από την «κούνια έως τη λιανική» (*cradle-to-retail*), περιλαμβάνοντας όλα τα σχετικά στάδια κύκλου ζωής, από την εξόρυξη πόρων έως την παράδοση τσιπούρας ζωντανού βάρους στα κέντρα διανομής σούπερ μάρκετ. Οι διεργασίες που περιλαμβάνονται είναι:

- ✓ Παραγωγή συστατικών ιχθυοτροφής, συμπεριλαμβανομένης της παραγωγής ιχθυάλευρου, της καλλιέργειας φυτών και της εξαγωγής ελαίων
- ✓ Μεταφορά συστατικών ιχθυοτροφής στις εγκαταστάσεις παραγωγής σύνθετης τροφής και στη συνέχεια στη μονάδα
- ✓ Λειτουργία εκκολαπτηρίου, συμπεριλαμβανομένης της διαχείρισης γεννητόρων, της επώασης αυγών, της εκτροφής προνυμφών και της προσαρμογής νεαρών ιχθύων
- ✓ Πάχυνση σε θαλάσσιους κλωβούς, συμπεριλαμβανομένης της χρήσης ενέργειας, του καθαρισμού διχτυών, του χειρισμού ψαριών και των συνήθων δραστηριοτήτων της μονάδας
- ✓ Συντήρηση υποδομών της μονάδας, συμπεριλαμβανομένης της κατανάλωσης καυσίμων σκαφών και της αντικατάστασης διχτυών
- ✓ Άμεσες εκπομπές από τον μεταβολισμό των ψαριών και τη μη καταναλωθείσα τροφή, δηλαδή εκροές αζώτου και φωσφόρου
- ✓ Συσκευασία και ψυχρή αποθήκευση των ψαριών που συγκομίζονται
- ✓ Ψυχόμενη μεταφορά του τελικού προϊόντος στα κέντρα διανομής σούπερ μάρκετ εντός Ελλάδας

Οι ακόλουθες διεργασίες εξαιρούνται από τα όρια του συστήματος:

- ✓ Επιπτώσεις σε επίπεδο καταναλωτή, όπως οικιακή ψύξη, μαγείρεμα και απορρίμματα τροφίμων
- ✓ Κατασκευή κεφαλαιουχικών υποδομών, συμπεριλαμβανομένων των συστημάτων κλωβών, των σκαφών και του εξοπλισμού σίτισης.
- ✓ Ευρύτερες επιπτώσεις αλλαγής χρήσεων γης που σχετίζονται με εισαγόμενα συστατικά ιχθυοτροφών.

- ✓ Έμμεσες επιπτώσεις στα οικοσυστήματα, όπως η απώλεια βιοποικιλότητας που συνδέεται με την εκμετάλλευση ιχθύων για παραγωγή ιχθυάλευρου και ιχθυελαίου.

Οι εξαιρέσεις αυτές ευθυγραμμίζονται με την καθιερωμένη πρακτική στην attributional LCA και αντανακλούν περιορισμούς διαθεσιμότητας δεδομένων και εφικτότητας μοντελοποίησης (Aubin, 2024; Pelletier & Tyedmers, 2009). Η επέκταση των ορίων πέρα από την πύλη της μονάδας ώστε να περιλαμβάνεται η διανομή μετά τη συγκομιδή αποτελεί σημαντικό μεθοδολογικό πλεονέκτημα, καθώς πολλές LCA υδατοκαλλιέργειας περιορίζουν την ανάλυση μόνο στα στάδια παραγωγής.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. Περιβαλλοντική Αξιολόγηση — Ανάλυση Κύκλου Ζωής (Life Cycle Analysis - LCA)

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η Ανάλυση Κύκλου Ζωής (Life Cycle Analysis - LCA) είναι μια μέθοδος περιβαλλοντικής αξιολόγησης που εκτιμά τη συνολική επίδραση ενός προϊόντος ή μιας διεργασίας σε ολόκληρο τον κύκλο ζωής του, από την εξόρυξη των πρώτων υλών έως την παραγωγή, τη χρήση και την τελική διάθεση. Παρέχει μια ολοκληρωμένη κατανόηση της κατανάλωσης πόρων, των εκπομπών και των πιθανών περιβαλλοντικών επιβαρύνσεων, συμβάλλοντας στον εντοπισμό ευκαιριών βελτίωσης και ενίσχυσης της βιωσιμότητας.

4.1. Ορισμός στόχου και πεδίου εφαρμογής

Στόχος και πεδίο εφαρμογής

Η Ανάλυση Κύκλου Ζωής (LCA) αποτελεί μια τυποποιημένη μεθοδολογία για την ποσοτικοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που συνδέονται με ένα προϊόν, μια διεργασία ή ένα σύστημα και εφαρμόζεται ευρέως στους τομείς της ενέργειας, των τροφίμων και των καταναλωτικών αγαθών. Σύμφωνα με το πλαίσιο ISO 14040/44, η παρούσα μελέτη σχεδιάστηκε ώστε να παρέχει μια διαφανή και αναπαραγώγιμη

αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιβαρύνσεων που συνδέονται με την παραγωγή τσιπούρας (*Sparus aurata*) σε ελληνική θαλάσσια υδατοκαλλιέργεια κλωβών.

Η παρούσα αξιολόγηση ακολουθεί τις αρχές των ISO 14040/44 και είναι δομημένη ώστε να υποστηρίζει συγκριτικούς ισχυρισμούς που προορίζονται για δημόσιο πεδίο, δίνοντας ιδιαίτερη έμφαση στη μεθοδολογική διαφάνεια, την αντιπροσωπευτικότητα των δεδομένων και τον ποιοτικό έλεγχο. Η ανασκόπηση της υφιστάμενης βιβλιογραφίας LCA στην υδατοκαλλιέργεια δείχνει σημαντική διαφοροποίηση ως προς τις λειτουργικές μονάδες, τα όρια συστήματος και τις διαδικασίες κατανομής, παράγοντες που μπορούν να εισάγουν μεροληψία. Για τον λόγο αυτό, οι μεθοδολογικές αυτές παράμετροι εξετάζονται ρητά στις επόμενες ενότητες, ώστε να διασφαλιστεί η αξιοπιστία και η ερμηνευσιμότητα των αποτελεσμάτων.

Λειτουργική μονάδα (FU)

Η λειτουργική μονάδα (Functional Unit - FU) της παρούσας μελέτης ορίζεται ως 1 kg ψυχόμενης, συσκευασμένης τσιπούρας, έτοιμης προς πώληση στο ράφι λιανικής. Η λειτουργική αυτή μονάδα είναι κατάλληλη για τη σύγκριση ολοκληρωμένων διαμορφώσεων της εφοδιαστικής αλυσίδας, καθώς περιλαμβάνει όχι μόνο τις επιπτώσεις της παραγωγής στη μονάδα, αλλά και τις μεταγενέστερες διεργασίες μετά την έξοδο από τη μονάδα, όπως τη χρήση ενέργειας στην ψυχρή αλυσίδα, τη συσκευασία και τη μεταφορά, οι οποίες επηρεάζουν σημαντικά την κλιματική αλλαγή και άλλους δείκτες επιπτώσεων midpoint.

Η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας αναφέρεται σε κιλοβατώρες ανά κιλό ($kWh \cdot kg^{-1}$) και, όπου η διάρκεια είναι σχετική, όπως στην έκθεση λιανικής, ως $kWh \cdot kg^{-1} \cdot day^{-1}$. Τα συστήματα ψύξης χαρακτηρίζονται με βάση την ονομαστική ισχύ τους (kW), ενώ η μεταφορά μοντελοποιείται με τη χρήση μετρημένων αποστάσεων διαδρομών (km) και μετατρέπεται σε τονοχιλιόμετρα (tkm) ανά λειτουργική μονάδα, όταν αυτό απαιτείται για τα δεδομένα απογραφής κύκλου ζωής.

Η πρόσφατη βιβλιογραφία LCA στην υδατοκαλλιέργεια τονίζει τη σημασία της επέκτασης των ορίων του συστήματος πέρα από την πύλη της μονάδας, ώστε να αποφεύγεται η μετατόπιση επιβαρύνσεων και να αποτυπώνονται οι αντισταθμίσεις που προκύπτουν στη μεταφορά, στη συσκευασία και στη λιανική εφοδιαστική, ιδιαίτερα σε δίκτυα διανομής που εξαρτώνται από την ψυχρή αλυσίδα (Bohnes et al., 2018). Επομένως, ο ορισμός αυτής της λειτουργικής μονάδας υποστηρίζει μια ολιστική

σύγκριση και ενισχύει τη συνάφεια της μελέτης για τη λήψη αποφάσεων σε ολοκληρωμένες αλυσίδες αξίας θαλασσινών.

Όρια συστήματος

• cradle-to-consumer (λιανική + χρήση, εξαιρουμένου του τέλους ζωής)

Η παρούσα μελέτη εφαρμόζει όρια συστήματος από την «κούνια έως τον καταναλωτή» (*cradle-to-consumer*), περιλαμβάνοντας όλα τα στάδια κύκλου ζωής από την εξόρυξη πρώτων υλών έως τη χρήση από τον καταναλωτή, ενώ εξαιρείται η διαχείριση τέλους ζωής των υλικών συσκευασίας και της υποδομής υδατοκαλλιέργειας.

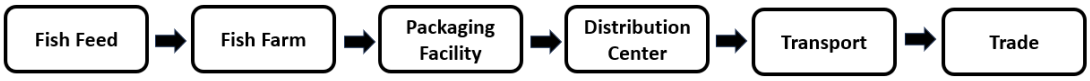
Τα δεδομένα βασίστηκαν κυρίως σε λειτουργικές μετρήσεις συγκεκριμένες για τη μονάδα. Για διεργασίες όπου δεν υπήρχαν διαθέσιμα άμεσα δεδομένα ή όπου η ποσοτικοποίηση ήταν δύσκολη, χρησιμοποιήθηκαν τιμές υποκατάστασης από τη δημοσιευμένη βιβλιογραφία και μεθόδους εκτίμησης πεδίου. Αυτές περιλαμβάνουν:

- ✓ Κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας στη μονάδα
- ✓ Χρήση πετρελαίου, μετατρεπόμενη από αρχεία κατανάλωσης καυσίμου γεννήτριας.
- ✓ Αποστάσεις οδικής μεταφοράς από τις εγκαταστάσεις επεξεργασίας προς περιφερειακά κέντρα διανομής.
- ✓ Ένταση ψύξης στη λιανική, μοντελοποιημένη με χρήση συντελεστών κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας ειδικών για το προϊόν.

Οι διεργασίες υποβάθρου που δεν μπορούσαν να μετρηθούν άμεσα, όπως τα μίγματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, η παραγωγή κουτιών EPS και συσκευασίας πολυπροπυλενίου και η διύλιση πετρελαίου, μοντελοποιήθηκαν με χρήση τυποποιημένων συνόλων δεδομένων από καθιερωμένες βάσεις απογραφής κύκλου ζωής (LCI), όπως η ecoinvent.

Κατά συνέπεια, τα όρια του συστήματος προϊόντος περιλαμβάνουν την αλυσίδα εφοδιασμού της ιχθυοτροφής, τις λειτουργίες εκκολαπτηρίου και πάχυνσης στη θαλάσσια μονάδα, την υποδομή συσκευασίας και επεξεργασίας, την ψυχρή εφοδιαστική αλυσίδα, καθώς και τη διανομή και τον χειρισμό στη λιανική. Το ολοκληρωμένο αυτό όριο επιτρέπει μια συνολική αξιολόγηση των περιβαλλοντικών

επιβαρύνσεων έως το σημείο χρήσης από τον καταναλωτή, βελτιώνοντας τη συγκρισιμότητα με ευρύτερες LCA συστημάτων τροφίμων και ευθυγραμμιζόμενο με σύγχρονα πλαίσια αναφοράς βιωσιμότητας.



Εικόνα 3: *Σύστημα προϊόντος από την «κούνια έως τον καταναλωτή», συμπεριλαμβανομένων των αναγκαίων μοναδιαίων διεργασιών για την παραγωγή τσιπούρας στην Ελλάδα*

Γεωγραφική τοποθεσία

Η εγκατάσταση υδατοκαλλιέργειας βρίσκεται στη θαλάσσια θέση «Γεώργιος Παπαργύρης» —προηγουμένως γνωστή ως Αγνούντας— στα παράκτια ύδατα ανοιχτά του Ακρωτηρίου Τραχήλι, στον Δήμο Επιδαύρου, Περιφερειακή Ενότητα Αργολίδας, Πελοπόννησος, Ελλάδα.

- **Χρονικός ορίζοντας**

Το χρονικό πεδίο εφαρμογής αντιστοιχεί σε έναν πλήρη κύκλο παραγωγής, ο οποίος ορίζεται ως η περίοδος πάχυνσης από το στάδιο του ιχθυδίου έως το εμπορεύσιμο μέγεθος και ανέρχεται περίπου σε 17 μήνες στη συγκεκριμένη μονάδα μελέτης. Για λόγους συνέπειας και προκειμένου να επιτραπεί η ευθυγράμμιση με ετήσια στατιστικά στοιχεία και μορφές αναφοράς, όλες οι ροές απογραφής και τα αποτελέσματα επιπτώσεων ετησιοποιούνται και παρουσιάζονται σε βάση 12 μηνών. Η προσέγγιση αυτή τυποποιεί τη χρονική αναφορά που χρησιμοποιείται στα σύνολα δεδομένων και στους υπολογισμούς, χωρίς να τροποποιεί τη λειτουργική μονάδα ή τα καθορισμένα όρια συστήματος από την «κούνια έως τον καταναλωτή».

4.2. Ανάλυση Απογραφής (LCI)

Για την εκπλήρωση των στόχων της παρούσας μελέτης, καταρτίστηκαν λεπτομερείς απογραφές κύκλου ζωής για όλες τις διεργασίες παραγωγής Τα δεδομένα αυτά παρατίθενται αναλυτικά στο Παράρτημα του Κεφαλαίου 9 και οι οι σχετικοί πίνακες με αρίθμηση 9.1 έως 9.7 . Η βάση δεδομένων ecoinvent v3.8 χρησιμοποιήθηκε ως η κύρια πηγή δεδομένων υποβάθρου και συμπληρώθηκε με τιμές από αξιολογημένη επιστημονική βιβλιογραφία LCA στην υδατοκαλλιέργεια, προκειμένου να διασφαλιστεί η αντιπροσωπευτικότητα των συστατικών ιχθυοτροφής, των λειτουργιών

εκκολαπτηρίου και των συνθηκών θαλάσσιας πάχυνσης. Η ecoinvent v3.8 αποτελεί μια ολοκληρωμένη βάση δεδομένων απογραφής κύκλου ζωής, η οποία παρέχει διαφανή δεδομένα εφοδιαστικής αλυσίδας σε τομείς όπως η ενέργεια, τα υλικά, η γεωργία, οι μεταφορές και η διαχείριση αποβλήτων. Η βάση δεδομένων οργανώνεται σε διάφορα μοντέλα συστήματος, όπως Allocation, cut-off by classification, APOS και Consequential, καθένα από τα οποία ορίζει τον τρόπο σύνδεσης των συνόλων δεδομένων και τον τρόπο κατανομής των περιβαλλοντικών επιβαρύνσεων μεταξύ συμπαραγόμενων προϊόντων. Η επιλογή ενός μοντέλου αποτελεί βασικό μέρος του ορισμού στόχου και πεδίου εφαρμογής (ecoinvent Association, 2024).

Στην παρούσα μελέτη, εφαρμόζεται το μοντέλο συστήματος Allocation, cut-off by classification. Σύμφωνα με αυτό το μοντέλο:

- ✓ Οι επιβαρύνσεις από την επεξεργασία αποβλήτων παραμένουν στον παραγωγό, και
- ✓ Τα ανακυκλώσιμα υλικά εισέρχονται σε επόμενους κύκλους χρήσης ελεύθερα από ανάντη επιβαρύνσεις.

Η επιλογή αυτή είναι συνεπής με την πρακτική της attributional LCA και ευθυγραμμίζεται με τη συνήθη χρήση της ecoinvent v3 σε μελέτες τροφίμων και υδατοκαλλιέργειας.

Για τις διεργασίες υποβάθρου, επιλέχθηκαν σύνολα δεδομένων αγοράς, όπως *market for X {GLO}*, ώστε να αναπαραστήσουν τη μέση εμπορεύσιμη προσφορά όταν δεν είχαν προσδιοριστεί συγκεκριμένες περιοχές προμήθειας ή προμηθευτές, σύμφωνα με τις κατευθυντήριες βέλτιστες πρακτικές για ροές εργασίας σε λογισμικό LCA (*SimaPro Tutorial*).

Για την υποστήριξη της στρατηγικής αξιολόγησης σεναρίων και της υπολογιστικής αποδοτικότητας, χρησιμοποιούνται system processes —δηλαδή συγκεντρωτικά σύνολα δεδομένων— αντί για unit processes στις κύριες εκτελέσεις του μοντέλου. Η επιλογή αυτή διατηρεί την αριθμητική ισοδυναμία με τη μοντελοποίηση μέσω unit processes, μειώνοντας ταυτόχρονα σημαντικά τον χρόνο υπολογισμού. Τα unit processes παραμένουν διαθέσιμα για διερεύνηση κρίσιμων σημείων ή διαγνωστική ιχνηλάτηση, εφόσον απαιτηθεί σε μεταγενέστερες φάσεις της ανάλυσης.

4.3. Εκτίμηση Επιπτώσεων (Ανάλυση Επιπτώσεων Κύκλου Ζωής -- LCIA)

Τα δεδομένα της απογραφής κύκλου ζωής που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 3, τα οποία περιλαμβάνουν τις αλυσίδες εφοδιασμού ιχθυοτροφών, τη λειτουργία θαλάσσιων κλωβών, τις εκπομπές διαλυμένων θρεπτικών ουσιών, την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας και πετρελαίου, τη συσκευασία και τα απόβλητα, την ψυχόμενη διανομή και την ψύξη στη λιανική, μετατράπηκαν σε δείκτες περιβαλλοντικών επιπτώσεων με τη χρήση του SimaPro. Εφαρμόστηκαν δύο ευρέως αναγνωρισμένες μέθοδοι LCIA:

✓ReCiPe 2016, τόσο σε επίπεδο midpoint όσο και endpoint, και
✓CML-IA, μόνο σε επίπεδο midpoint.

Η χρήση τόσο midpoint όσο και endpoint αξιολογήσεων εξυπηρετεί διπλό σκοπό. Οι midpoint δείκτες επιτρέπουν τον λεπτομερή εντοπισμό κρίσιμων σημείων επιβάρυνσης, όπως ο ευτροφισμός, η κλιματική αλλαγή και ο σχηματισμός αιωρούμενων σωματιδίων, ενώ οι endpoint δείκτες παρέχουν μια υψηλότερου επιπέδου ερμηνεία των συνολικών ζημιών στην ανθρώπινη υγεία, στα οικοσυστήματα και στη διαθεσιμότητα πόρων.

Η διπλή αυτή μεθοδολογική διαμόρφωση είναι ιδιαίτερα κατάλληλη για τη μεσογειακή υδατοκαλλιέργεια, όπου η χρήση ιχθυοτροφών και ενέργειας κυριαρχεί σε πολλές midpoint κατηγορίες, όπως οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, η χρήση γης και η εξάντληση ορυκτών πόρων, ενώ οι εκροές διαλυμένων θρεπτικών ουσιών αποτελούν τον κύριο οδηγό του ευτροφισμού, ο οποίος αξιολογείται καλύτερα σε επίπεδο midpoint, αλλά συχνά επικοινωνείται πιο κατανοητά μέσω συνοπτικών endpoint αποτελεσμάτων. Τα προαιρετικά στάδια LCIA, συμπεριλαμβανομένων της κανονικοποίησης, της ομαδοποίησης και της στάθμισης, αναφέρθηκαν αλλά δεν χρησιμοποιήθηκαν για τη λήψη αποφάσεων, σύμφωνα με τις απαιτήσεις του ISO 14044 για διαφάνεια και αναπαραγωγιμότητα.

Η δομημένη αυτή προσέγγιση επιτρέπει ελέγχους σταθερότητας των κρίσιμων σημείων επιβάρυνσης μεταξύ δύο midpoint μεθόδων, δηλαδή ReCiPe Midpoint και CML-IA, καθώς και συνεπή επικοινωνία των επιπτώσεων βιωσιμότητας σε επίπεδο endpoint, υποστηρίζοντας τους υπεύθυνους λήψης αποφάσεων που εμπλέκονται στη διαχείριση

υδατοκαλλιεργειών, στην ευθυγράμμιση με πολιτικές και στις στρατηγικές βιωσιμότητας προϊόντων.

Η ReCiPe 2016 είναι μια εναρμονισμένη μέθοδος LCIA που παρέχει χαρακτηρισμό τόσο σε midpoint όσο και σε endpoint επίπεδο, επιτρέποντας την ερμηνεία των αποτελεσμάτων είτε ως περιβαλλοντικών πιέσεων βασισμένων σε μηχανισμούς, δηλαδή midpoint, είτε ως ζημιών σε περιοχές προστασίας, δηλαδή endpoints: ανθρώπινη υγεία, οικοσυστήματα και διαθεσιμότητα πόρων. Η ενημέρωση του 2016 εισάγει παγκόσμια αντιπροσωπευτικούς συντελεστές χαρακτηρισμού, βελτιωμένες διαδρομές μετατροπής από midpoint σε endpoint και ένα ολοκληρωμένο σύνολο midpoint κατηγοριών επιπτώσεων, συμπεριλαμβανομένων της κλιματικής αλλαγής, του ευτροφισμού, της οξίνισης και του σχηματισμού αιωρούμενων σωματιδίων.

Οι endpoint συντελεστές συγκεντρώνουν αυτές τις επιδράσεις σε Disability-Adjusted Life Years (DALY) για την ανθρώπινη υγεία, σε species·year για τη ζημία στα οικοσυστήματα και σε δείκτες σπανιότητας πόρων για τη χρήση πόρων, με δυνατότητα προαιρετικής κανονικοποίησης και στάθμισης για σκοπούς επικοινωνίας και υποστήριξης αποφάσεων. Συνολικά, η ReCiPe 2016 παρέχει μια συνεπή και διαφανή σύνδεση από τις ροές απογραφής προς τις midpoint επιπτώσεις και στη συνέχεια προς ερμηνεύσιμα αποτελέσματα επιπέδου ζημίας, γεγονός που την καθιστά κατάλληλη για ολοκληρωμένες αξιολογήσεις βιωσιμότητας (Huijbregts et al., 2017).

Η CML-IA είναι μια ευρέως χρησιμοποιούμενη ευρωπαϊκή μέθοδος LCIA που επικεντρώνεται αποκλειστικά στον midpoint χαρακτηρισμό. Από τον σχεδιασμό της, αποφεύγει τη μοντελοποίηση ζημιών και τη στάθμιση που εμπεριέχουν αξιακές κρίσεις, διατηρώντας τους δείκτες κοντά στους υποκείμενους μηχανισμούς, όπως GWP100, οξίνιση, ευτροφισμός και σχηματισμός φωτοχημικού όζοντος. Αυτή η προσέγγιση που βασίζεται μόνο στον χαρακτηρισμό είναι ιδιαίτερα κατάλληλη για διαγνωστική ανάλυση κρίσιμων σημείων και ελέγχους ευαισθησίας, επειδή η αβεβαιότητα των παραμέτρων είναι χαμηλότερη και τα αποτελέσματα συνδέονται πιο άμεσα με συγκεκριμένες στοιχειώδεις ροές. Στο SimaPro, η CML-IA παρέχεται ως τυπική οικογένεια μεθόδων σε επίπεδο midpoint, χωρίς ενσωματωμένη κανονικοποίηση/στάθμιση ή μοντελοποίηση ζημιών endpoint.

Κατηγορίες Επιπτώσεων: Midpoint και Endpoint

Οι δείκτες midpoint αποτυπώνουν τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις σε ενδιάμεσο στάδιο της αλυσίδας αιτίου-αποτελέσματος, μετατρέποντας τις εκπομπές και τη χρήση πόρων σε συγκεκριμένες κατηγορίες επιπτώσεων. Ενδεικτικά παραδείγματα αποτελούν η κλιματική αλλαγή, η οξίνιση, ο ευτροφισμός, ο σχηματισμός αιωρούμενων σωματιδίων και ο σχηματισμός φωτοχημικού όζοντος. Στην παρούσα μελέτη χρησιμοποιήθηκαν οι μέθοδοι ReCiPe 2016 και CML-IA, ώστε να εξεταστεί η σταθερότητα των κρίσιμων σημείων και να εντοπιστούν οι βασικοί μηχανισμοί επιβάρυνσης, όπως η χρήση ιχθυοτροφών, οι εκροές θρεπτικών ουσιών, η κατανάλωση καυσίμων και η χρήση ηλεκτρικής ενέργειας.

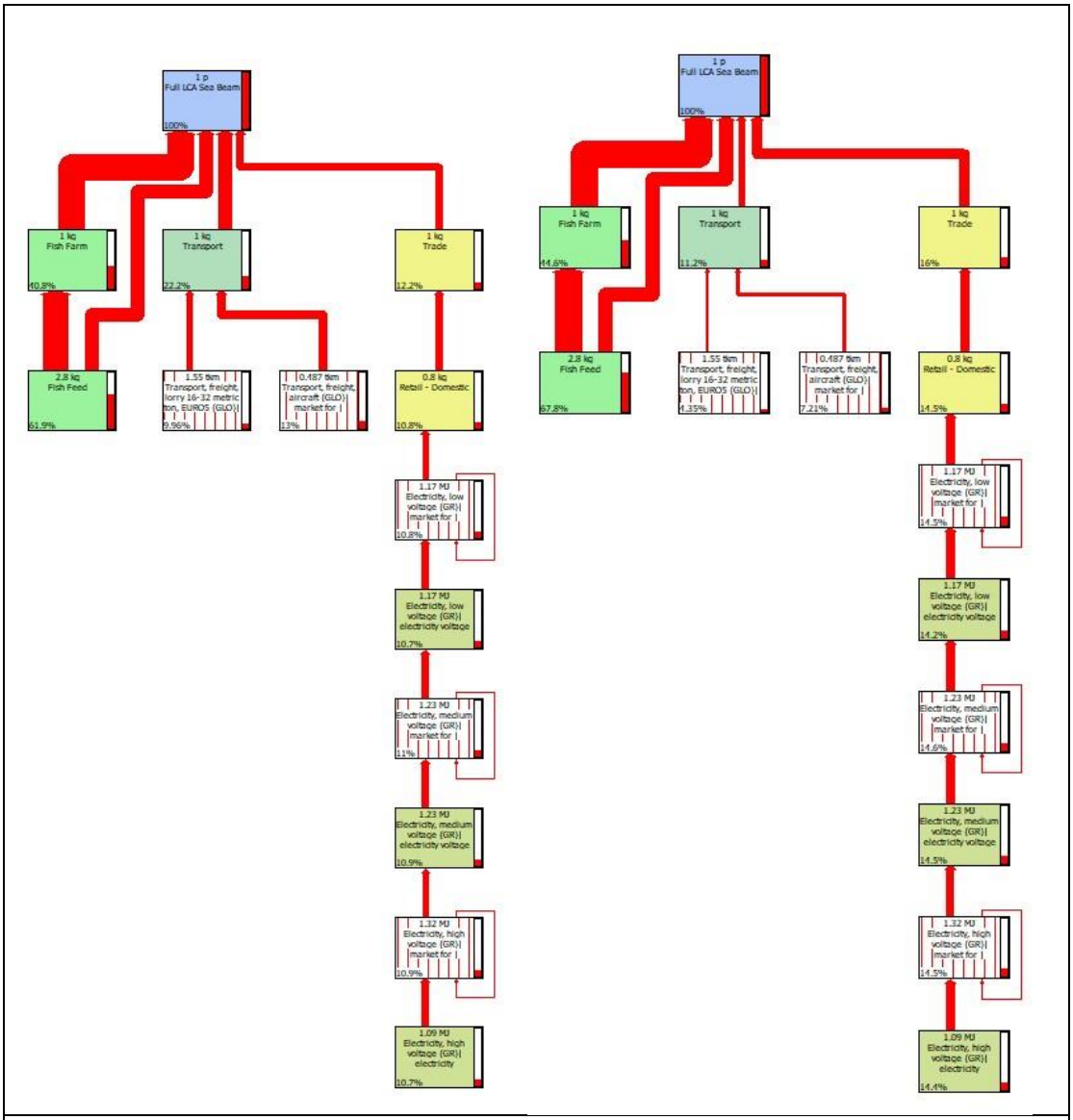
Οι δείκτες endpoint συγκεντρώνουν τις επιπτώσεις σε ευρύτερες κατηγορίες ζημίας και χρησιμοποιούνται κυρίως για τη συνοπτική παρουσίαση και ερμηνεία των αποτελεσμάτων. Στη ReCiPe 2016 οι endpoint επιπτώσεις ομαδοποιούνται σε τρεις βασικές κατηγορίες: ανθρώπινη υγεία, ποιότητα οικοσυστημάτων και σπανιότητα πόρων. Στην παρούσα μελέτη, οι endpoint δείκτες αξιοποιούνται συμπληρωματικά προς τα midpoint αποτελέσματα, ώστε να διευκολυνθεί η συνολική αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων και η σύγκριση των βασικών σταδίων της παραγωγικής αλυσίδας. Τα προαιρετικά στάδια της κανονικοποίησης, της στάθμισης και του single score χρησιμοποιούνται επικουρικά, χωρίς να αποτελούν τη μοναδική βάση εξαγωγής συμπερασμάτων, σύμφωνα με τις κατευθύνσεις του ISO 14044 (ISO, 2006; Huijbregts et al., 2017; PRé Sustainability, 2024; Leiden University, 2016).

4.5. Αναφορά και Οπτικοποίηση Αποτελεσμάτων

Η διαδικασία αναφοράς και οπτικοποίησης πραγματοποιείται μέσω της χρήσης διαγραμμάτων ροής και σχημάτων, τα οποία απεικονίζουν τα κύρια στάδια και τις σχέσεις μέσα στο σύστημα.

Διαγράμματα ροής

Τα Δέντρα δικτύου συμβολής διεργασιών που δημιουργήθηκαν στο SimaPro για το σύστημα παραγωγής τσιπούρας σε θαλάσσιους κλωβούς, με χρήση της ReCiPe 2016 Endpoint. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται τόσο ανά κατηγορία ζημίας —Ανθρώπινη Υγεία, Οικοσυστήματα, Πόροι— όσο και ως σταθμισμένο Single Score. Η λειτουργική μονάδα είναι 1 kg ψαριού έτοιμου για αγορά. Οι διεργασίες υποβάθρου βασίζονται σε ecoinvent v3 market datasets, ενώ η παροχή ηλεκτρικής ενέργειας αντανακλά το ελληνικό μίγμα ηλεκτρικής ενέργειας.



Εικόνα 2a: *Flowchart endpoint ecosystem* ***Εικόνα 2b:*** *Flowchart endpoint human health*

Εικόνα 4*: Flowchart endpoint αποτελέσματα*

Για κάθε διάγραμμα ροής, Εικόνες 2α και 2β χρησιμοποιήθηκε η επιλογή Network → Contribution analysis (damage assessment) στο επιλεγμένο έργο LCA και επιλέχθηκαν ReCiPe 2016 Endpoint για την Ανθρώπινη Υγεία (Human Health - HH), τα Οικοσυστήματα (Ecosystems - ECO), τους Πόρους (Resources - RES), καθώς και το συγκεντρωτικό Single Score. Για λόγους διαφάνειας, όλα τα αποτελέσματα αξιολόγησης ζημίας που αντιστοιχούν σε αυτά τα γραφήματα συγκεντρώνονται στους «Αναλυτικούς Πίνακες Απογραφής». Στις κανονικοποιημένες και endpoint προβολές («damage») του SimaPro, τα ποσοστά των κόμβων δείχνουν τη συμμετοχή κάθε διεργασίας στο επιλεγμένο endpoint, ενώ το πάχος των κόκκινων γραμμών αναδεικνύει τις κυρίαρχες διαδρομές της εφοδιαστικής αλυσίδας. Τα πλαίσια αντιστοιχούν σε μοναδιαίες διεργασίες, ενώ η μικρή κόκκινη μπάρα μέσα σε κάθε πλαίσιο οπτικοποιεί το ποσοστό συμβολής της διεργασίας.

Η ανάγνωση των δέντρων από αριστερά προς τα δεξιά δείχνει ότι οι κυρίαρχοι οδηγοί επιπτώσεων, τόσο στο foreground όσο και στο background σύστημα, είναι η παραγωγή ιχθυοτροφής και οι λειτουργίες της μονάδας. Η μεταφορά και η λιανική έχουν δευτερεύουσα συμβολή. Η συσκευασία και τα περισσότερα επιμέρους στάδια μεταφοράς συνεισφέρουν μικρότερα ποσοστά, ενώ η αερομεταφορά εμφανίζεται όπου εφαρμόζεται. Συνολικά, τα δέντρα καθιστούν σαφές πού συσσωρεύονται οι επιπτώσεις και εντοπίζουν τα ανάντη κρίσιμα σημεία επιβάρυνσης, καθοδηγώντας στοχευμένες βελτιώσεις (Database Manual Methods).

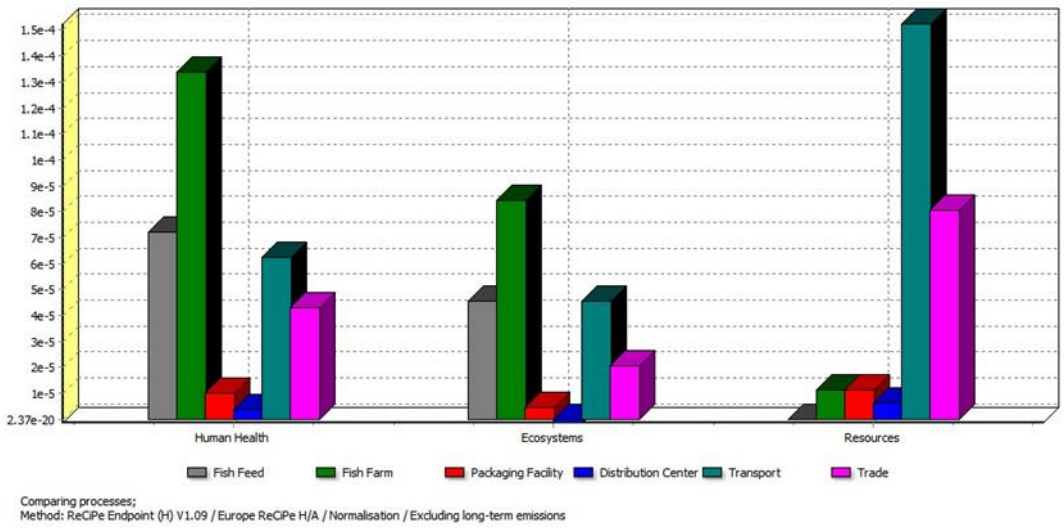
Διαγράμματα (Εικόνες)

Παρακάτω παρουσιάζονται τα endpoint αποτελέσματα υπό δύο προοπτικές της ReCiPe 2016: την Hierarchist (H), δηλαδή την προεπιλεγμένη προοπτική που βασίζεται σε επιστημονική συναίνεση, στις Εικόνες 4 και 4, και την Egalitarian (E), δηλαδή την προληπτική προοπτική, στις Εικόνες 6 και 7. Η χρήση και των δύο προοπτικών επιτρέπει τον έλεγχο της σταθερότητας των αποτελεσμάτων, καθώς κάθε προοπτική βασίζεται σε διαφορετικές παραδοχές σχετικά με τον χρονικό ορίζοντα και τον βαθμό προληπτικής στάσης. Η ιεραρχική προοπτική (H) θεωρείται πιο κοντά στις συνήθεις

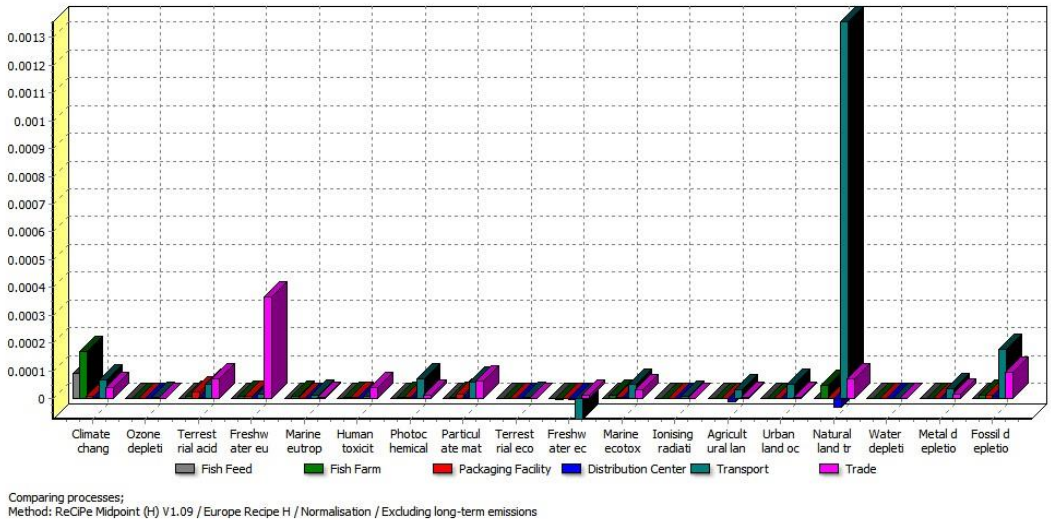
επιστημονικές και πολιτικές συμβάσεις, ενώ η εξισωτική προοπτική (E) υιοθετεί μια πιο προληπτική και μακροπρόθεσμη θεώρηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Για παράδειγμα, στην κατηγορία της κλιματικής αλλαγής, ο χρονικός ορίζοντας είναι 100 έτη στην προοπτική H και 1.000 έτη στην προοπτική E. Με τον τρόπο αυτό, η σύγκριση των δύο προοπτικών συμβάλλει στην καλύτερη ερμηνεία των αποτελεσμάτων και στην ανάδειξη πιθανών διαφορών που οφείλονται στις μεθοδολογικές παραδοχές της ReCiPe. Και στις δύο περιπτώσεις, τα αποτελέσματα endpoint ομαδοποιούν τις επιπτώσεις σε τρεις βασικές περιοχές προστασίας: την ανθρώπινη υγεία, την ποιότητα των οικοσυστημάτων και τη διαθεσιμότητα πόρων, οι οποίες εκφράζονται αντίστοιχα σε DALY, species·year και USD2013 (Huijbregts et al., 2017; Dekker et al., 2019; PRé Sustainability, 2024).

Κανονικοποίηση και στάθμιση

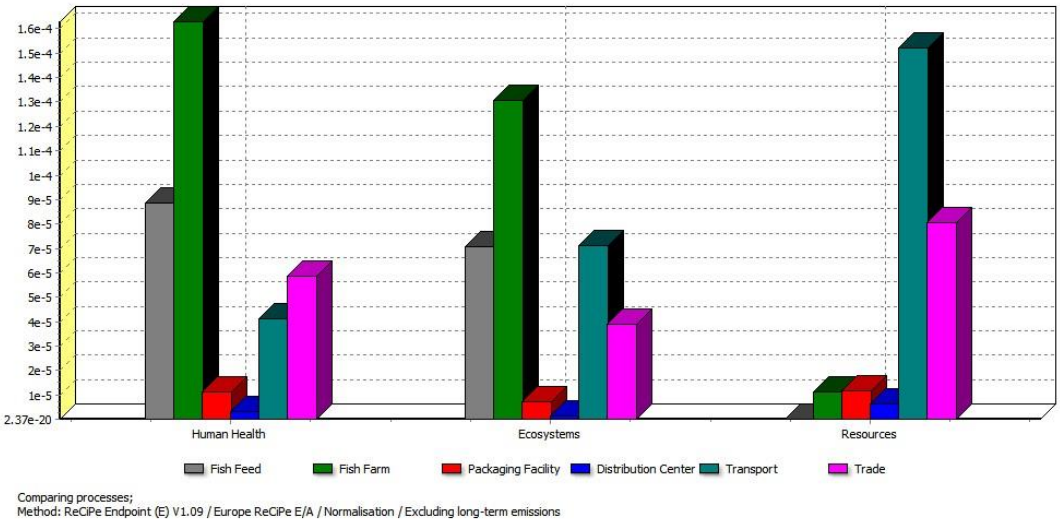
Σύμφωνα με το ISO 14044, η κανονικοποίηση και η στάθμιση είναι προαιρετικές και εξαρτώνται από αξιακές επιλογές. Όποτε εφαρμόζονται, για παράδειγμα για τη δημιουργία single scores, αυτό δηλώνεται ρητά και τα αποτελέσματα πριν από την κανονικοποίηση και τη στάθμιση διατηρούνται για την ερμηνεία (ISO-14044-2006_2; Database Manual Methods).



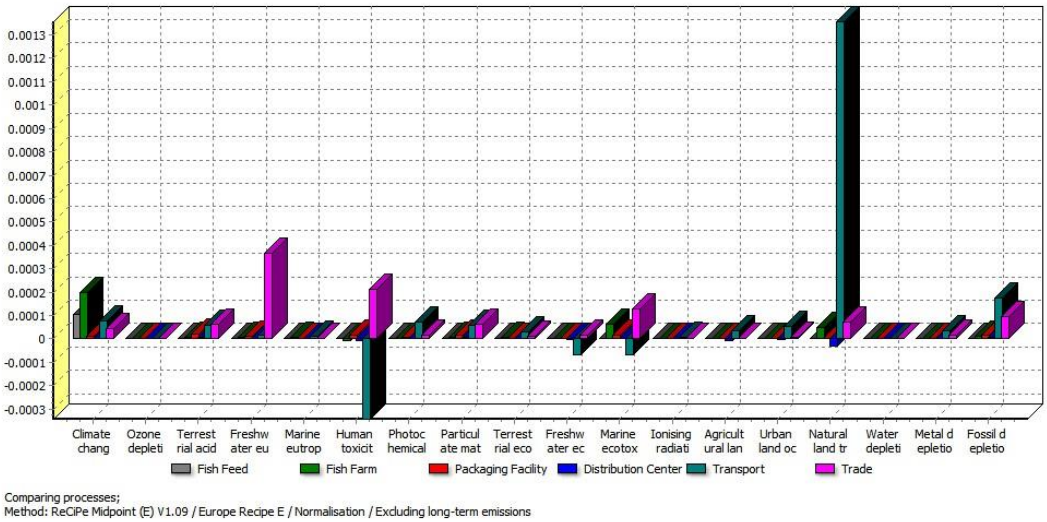
Εικόνα 5: *Recipe Hierarchrist endpoint normalization*



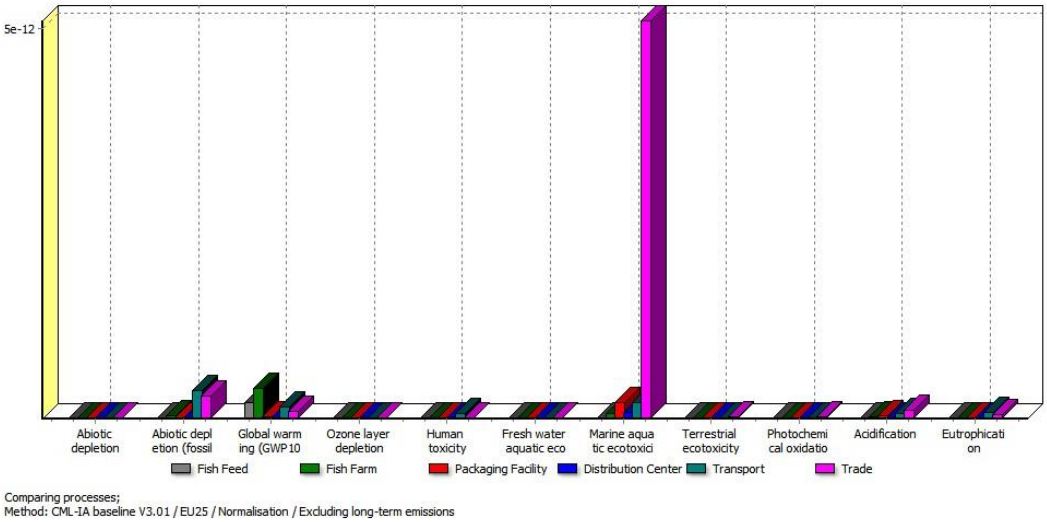
***Εικόνα 6**: Hierarchrist midpoint normalization*



***Εικόνα 7:** Εικόνα 6: Recipe Egalitarian endpoint normalization*



Εικόνα 8: *Recipe Egalitarian midpoint normalization*



Εικόνα 9*: CLM Normalazation*

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. Οικονομική Αξιολόγηση (LCC) και Κοινωνική Αξιολόγηση (SLCA)

5.1. Ανάλυση Κόστους Κύκλου Ζωής (LCC) — Μέθοδοι, Παραδοχές και Αποτελέσματα

Βασιζόμενο στα περιβαλλοντικά κρίσιμα σημεία που εντοπίστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο 4 -κυρίως την κυριαρχία της πάχυνσης στη μονάδα και της ιχθυοτροφής, με την εφοδιαστική και την ενέργεια στη λιανική να αποτελούν δευτερεύοντες συντελεστές - το Κεφάλαιο 5 επεκτείνει την ανάλυση με Ανάλυση Κόστους Κύκλου Ζωής (Life-Cycle Costing -- LCC) για τα ίδια όρια συστήματος. Σύμφωνα με τις οδηγίες SETAC/UNEP και την πρακτική απογραφής συμβατή με ISO, η LCC χρησιμοποιείται εδώ ως χρηματοοικονομικό εργαλείο που συγκεντρώνει τα ταμειακά κόστη που επωμίζεται ο φορέας εκμετάλλευσης στα στάδια του κύκλου ζωής, όπως γόνος/ιχθύδια, ιχθυοτροφή, ενέργεια και καύσιμα, νερό, συσκευασία, μεταφορά, ψύξη κ.λπ., ώστε να αναδειχθούν τα οικονομικά κρίσιμα σημεία και οι πρώτης τάξης ευαισθησίες, και όχι για τη νομισματική αποτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων (Hunkeler et al., 2008; ISO 14044). Για λόγους πληρότητας και διαφάνειας - και επειδή δεν υπήρχε διαθέσιμο εξειδικευμένο λογισμικό LCC αντίστοιχο με την πλατφόρμα LCA - το μοντέλο κόστους υλοποιήθηκε σε αναπαραγώγιμο περιβάλλον Microsoft Excel, χρησιμοποιώντας δεδομένα αγοράς/τιμολογίων και τιμές από τη βιβλιογραφία, και συμπληρώθηκε με μονοπαραγοντικές δοκιμές ευαισθησίας. Η συνδυασμένη προσέγγιση LCA--LCC επιτρέπει την ιεράρχηση επιλογών βελτίωσης που είναι ουσιαστικές τόσο περιβαλλοντικά όσο και οικονομικά, όπως η προμήθεια/σύνθεση ιχθυοτροφής, η τιμή και επιβίωση του γόνου, καθώς και η στοχευμένη αποδοτικότητα ενέργειας και ψυχρής αλυσίδας, και την αξιολόγηση εναλλακτικών σεναρίων στις επόμενες ενότητες.

5.1.1. Στόχος και πεδίο εφαρμογής

Η Ανάλυση Κόστους Κύκλου Ζωής (Life Cycle Costing - LCC) εφαρμόζεται με στόχο την εκτίμηση του χρηματοοικονομικού κόστους παραγωγής και παράδοσης 540 t/έτος ψυχόμενης τσιπούρας στο κέντρο διανομής. Η ανάλυση διατηρεί συνέπεια με τα όρια συστήματος της περιβαλλοντικής LCA, καλύπτοντας τα βασικά στάδια της αλυσίδας: μονάδα ιχθυοκαλλιέργειας, ιχθυοτροφή, μεταφορά και εμπόριο. Η προσέγγιση ακολουθεί συμβατική LCC από την οπτική του φορέα εκμετάλλευσης, περιλαμβάνοντας τα άμεσα κόστη που επιβαρύνουν τον παραγωγό και τους φορείς της

εφοδιαστικής αλυσίδας, ενώ δεν περιλαμβάνει εξωτερικότητες, όπως περιβαλλοντικές, κοινωνικές ή δημόσιας υγείας ζημίες. Η επιλογή αυτή είναι συμβατή με τις κατευθύνσεις SETAC/UNEP για αναλύσεις κόστους συνδεδεμένες με LCA και με πρακτικές απογραφής σύμφωνα με το ISO 14044 (Hunkeler et al., 2008; ISO 14044, 2006).

Το μοντέλο κόστους βασίζεται στις ποσότητες εισροών που χρησιμοποιήθηκαν στο τεχνοοικονομικό φύλλο εργασίας, όπως ιχθύδια, ιχθυοτροφή, ενέργεια, καύσιμα, νερό, υλικά συσκευασίας, πετρέλαιο μεταφοράς και ψύξη διανομής. Οι μοναδιαίες τιμές αντλήθηκαν από δημόσιες πηγές αγοράς, τιμολόγια και αξιολογημένη επιστημονική βιβλιογραφία για τη μεσογειακή υδατοκαλλιέργεια. Συγκεκριμένα, για τον γόνο χρησιμοποιήθηκε ποσότητα 1.962.500 ιχθυδίων με τιμή 0,22 €/τεμάχιο, ενώ για την ιχθυοτροφή χρησιμοποιήθηκαν 972.000 kg με τιμή 1,50 €/kg, σύμφωνα με στοιχεία της μεσογειακής αγοράς και μελέτες που αναδεικνύουν την ιχθυοτροφή ως το κυρίαρχο λειτουργικό κόστος της υδατοκαλλιέργειας (EUMOFA, 2024; Henriksson et al., 2015).

Για την ηλεκτρική ενέργεια της συσκευασίας υπολογίστηκαν 63.000 kWh με τιμή 0,15 €/kWh, βάσει εμπορικού τιμολογίου από τη Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας, ενώ η ηλεκτρική ενέργεια στη μονάδα, φορτηγίδα και γεννήτριες εκτιμήθηκε σε 5.000 €, με βάση την ονομαστική ισχύ γεννήτριας και τυπικό συντελεστή φορτίου (RAE, 2024). Τα καύσιμα για τη συσκευασία περιλαμβάνουν 10.050 L πετρελαίου με 1,6 €/L και 21.800 L βενζίνης με 1,8 €/L, ενώ για τη διανομή υπολογίστηκαν 4.896 L πετρελαίου με 1,6 €/L, σύμφωνα με εθνικές μέσες τιμές καυσίμων (Fuelprices.gr, 2024). Επιπλέον, η κατανάλωση νερού στο στάδιο της συσκευασίας εκτιμήθηκε σε 396 m^3 με τιμή 1 €/m^3, βάσει βιομηχανικού τιμολογίου, ενώ τα υλικά συσκευασίας υπολογίστηκαν σε 59.485,5 €, βάσει του καταλόγου υλικών της γραμμής συσκευασίας (ΕΥΔΑΠ Α.Ε., 2024). Τέλος, το κόστος ψύξης διανομής εκτιμήθηκε σε 3.000 €, ως λειτουργική εκτίμηση της ψυχρής αλυσίδας, σε συμφωνία με μελέτες εφοδιαστικής θαλασσινών (Pelletier et al., 2007).

Όπου οι πηγές παρείχαν εύρη τιμών, επιλέχθηκαν συντηρητικές μεσαίες τιμές, ώστε να αποφευχθεί η υπερεκτίμηση ή υποεκτίμηση του κόστους. Όλες οι τιμές εκφράζονται σε ευρώ 2024, προκειμένου να διατηρείται ενιαία βάση υπολογισμού και να είναι δυνατή η σύγκριση μεταξύ των επιμέρους κατηγοριών κόστους.

5.1.2. Αποτελέσματα

Το συνολικό μοντελοποιημένο κόστος ανέρχεται σε περίπου 1.970.834 €, ισοδύναμο με περίπου 3.649 €/t και περίπου 3,65 €/kg προϊόντος στο κέντρο διανομής.

Δομή κόστους ως ποσοστό του συνολικού κόστους

- ✓ Ιχθυοτροφή: 1.458.000 € (74,0%)
- ✓ Ιχθύδια: 372.350 € (18,9%)
- ✓ Υλικά συσκευασίας: 59.485,5 € (3,0%)
- ✓ Βενζίνη για συσκευασία: 39.240 € (2,0%)
- ✓ Πετρέλαιο για συσκευασία: 16.080 € (0,8%)
- ✓ Ηλεκτρική ενέργεια για συσκευασία: 9.450 € (0,5%)
- ✓ Πετρέλαιο μεταφοράς: 7.833 € (0,4%)
- ✓ Ηλεκτρική ενέργεια μονάδας, γεννήτρια: 5.000 € (0,25%)
- ✓ Ψύξη διανομής: 3.000 € (0,15%)
- ✓ Νερό: 396 € (0,02%)

Πίνακας 3: *Απογραφή για την LCC. Πηγή: ιδία επεξεργασία με βάση RAE (2024), Fuelprices.gr (2024), EYDAP (2024), EUMOFA — EU Fish Market Reports (2024), και Henriksson PJG et al. (2015).*

Input	Quantity	Unit Price	Total Cost (€)
Fingerlings	1,962,500 pcs	0.22 €/pc	372,350
Fish Feed	972,000 kg	1.5 €/kg	1,458,000
Electricity (Packaging)	63,000 kWh	0.15 €/kWh	9,450
Electricity (Fish Farm)	Estimated	—	5,000
Fuel (Packaging) — Diesel	10,050 lt	1.6 €/lt	16,080
Fuel (Packaging) — Gasoline	21,800 lt	1.8 €/lt	39,240
Water (Packaging)	396 m³	1 €/m³	396
Packaging Materials	—	—	59,485.5
Transport Diesel (Distribution)	4,896 lt	1.6 €/lt	7,833
Cooling (Distribution)	Estimated	—	3,000
TOTAL COST	—	—	~1,970,834 €

Ακολουθώντας αυτή τη λογική, μοντελοποιήσαμε την ανάλυση με βάση την υπάρχουσα LCA και τα δεδομένα που συγκεντρώθηκαν σε υπολογιστικό φύλλο Excel, και διαπιστώσαμε ότι τα οικονομικά κρίσιμα σημεία είναι η ιχθυοτροφή (Feed, ~74%)

και τα ιχθύδια (Fingerlings, ~19%). Το προφίλ αυτό είναι πλήρως συνεπές με τις λειτουργίες μεσογειακής εκτροφής ιχθύων, όπου η τροφή και ο γόνος κυριαρχούν στις λειτουργικές δαπάνες (OPEX) και κλιμακώνονται στενά με τη βιομάζα και τον δείκτη μετατρεψιμότητας τροφής (FCR) (Henriksson et al., 2015; EUMOFA, 2024).

5.1.3. Ανάλυση ευαισθησίας

Δεδομένης της συγκέντρωσης του κόστους σε δύο βασικά στοιχεία, ακόμη και μέτριες μεταβολές στις τιμές τους μεταβάλλουν ουσιαστικά το κόστος ανά kg:

- Τιμή ιχθυοτροφής ±10% → ±0,27 €/kg, δηλαδή περίπου ±7,4%.
- Τιμή ιχθυδίων ±10% → ±0,069 €/kg, δηλαδή περίπου ±1,9%.
- Η ενέργεια και τα καύσιμα έχουν μικρότερη επίδραση στις βασικές ποσότητες αναφοράς:
- Ηλεκτρική ενέργεια συσκευασίας +50% → +0,0088 €/kg· ηλεκτρική ενέργεια μονάδας +50% → +0,0046 €/kg.
- Καύσιμα συσκευασίας +20% → πετρέλαιο +0,0060 €/kg, βενζίνη +0,0145 €/kg
- Πετρέλαιο μεταφοράς +20% → +0,0029 €/kg.

Τα μεγέθη αυτά συμφωνούν με τα στοιχεία του κλάδου, σύμφωνα με τα οποία η προμήθεια —ιδίως η ιχθυοτροφή και ο γόνος— αποτελεί τον πρωταρχικό μοχλό ανθεκτικότητας κόστους, ενώ η ενεργειακή αποδοτικότητα, αν και σημαντική για τη διαχείριση κινδύνου και τη βιωσιμότητα, έχει δευτερεύουσα επίδραση στο συνολικό €/kg στα τρέχοντα επίπεδα κατανάλωσης (Henriksson et al., 2015; Pelletier et al., 2007).

5.1.4. Παραδοχές και περιορισμοί

Στην παρούσα ανάλυση εφαρμό χρηματοοικονομική Ανάλυση Κόστους Κύκλου Ζωής (Life Cycle Costing - LCC) σε πλαίσιο μεταπτυχιακής διπλωματικής δεν ηπήρχαν οικονομικά στοιχεία από την οπτική της επιχείρησης. Συνεπώς, δεν περιλαμβάνει αποσβέσεις κεφαλαίου, εργασία, γενικά έξοδα, χρηματοδότηση και φορολογία, εκτός εάν τα κόστη αυτά ήταν έμμεσα ενσωματωμένα στις μοναδιαίες τιμές των εισροών (Hunkeler et al., 2008), το οποίο είναι άγνωστο και δεν είναι το θέμα που εξετάζει αυτή η εργασία. Επιπλέον, η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας για τη φορτηγίδα της μονάδας και η ψύξη κατά τη διανομή βασίζονται σε τεχνικές εκτιμήσεις, καθώς δεν υπήρχαν διαθέσιμα μετρημένα δεδομένα. Όλες οι τιμές αντανακλούν τις συνθήκες της ελληνικής αγοράς για το 2024, με βάση πηγές όπως RAE, Fuelprices.gr και ΕΥΔΑΠ.

Λόγω της μεταβλητότητας των τιμών, η αβεβαιότητα αξιολογείται μέσω ανάλυσης σεναρίων και ευαισθησίας. Η συσκευασία αντιμετωπίζεται στο βασικό σενάριο ως ενιαία κατηγορία κόστους, αν και πιθανές αντικαταστάσεις υλικών, όπως η χρήση διογκωμένης πολυστερίνης (EPS) ή επαναχρησιμοποιούμενων πλαστικών κιβωτίων (RPC), μπορούν να μεταβάλουν τόσο τη δομή κόστους όσο και την εφοδιαστική λειτουργία.

Από διαχειριστική άποψη, η ανάλυση αναδεικνύει τρεις βασικούς μοχλούς βελτιστοποίησης του κόστους και ενίσχυσης της επιχειρησιακής ανθεκτικότητας. Πρώτον, η ιχθυοτροφή αποτελεί τον σημαντικότερο παράγοντα κόστους παραγωγής. Η εξασφάλιση μακροχρόνιων συμβολαίων προμήθειας και η διερεύνηση εναλλακτικών συνθέσεων με ισοδύναμη θρεπτική απόδοση και χαμηλότερη μοναδιαία τιμή μπορούν να οδηγήσουν σε σημαντική εξοικονόμηση. Ενδεικτικά, κάθε μείωση της τιμής της ιχθυοτροφής κατά 0,05 €/kg αντιστοιχεί σε μείωση περίπου 0,036 €/kg στο κόστος του τελικού προϊόντος, με βάση το μοντελοποιημένο επίπεδο χρήσης τροφής. Δεύτερον, η προμήθεια γόνου και η επιβίωση των ιχθυδίων αποτελούν κρίσιμες παραμέτρους, καθώς επηρεάζουν άμεσα το μοναδιαίο κόστος και αντιπροσωπεύουν περίπου το 19% των συνολικών δαπανών. Τρίτον, η διαχείριση ενέργειας και εφοδιαστικής, μέσω βελτιστοποίησης διαδρομών, υψηλών συντελεστών φόρτωσης και σωστής συντήρησης των συστημάτων ψύξης, μπορεί να περιορίσει την έκθεση στη μεταβλητότητα των τιμών ενέργειας. Παρότι η άμεση επίδρασή της σε €/kg είναι μικρότερη, συμβάλλει παράλληλα στη βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας και στη μείωση των εκπομπών, ενισχύοντας και την περιβαλλοντική επίδοση της LCA.

5.2. Κοινωνική Αξιολόγηση Κύκλου Ζωής (Social Life-Cycle Assessment - S-LCA)

5.2.1 Σκοπός και προσέγγιση

Για τη συμπλήρωση της περιβαλλοντικής LCA και της οικονομικής LCC, πραγματοποιήθηκε προκαταρκτική Κοινωνική Αξιολόγηση Κύκλου Ζωής (Social Life-Cycle Assessment - S-LCA) για την ίδια αλυσίδα αξίας, η οποία περιλαμβάνει την πάχυνση σε θαλάσσιους κλωβούς, τη συσκευασία και την ψυχόμενη διανομή. Η αξιολόγηση ακολουθεί τις κατευθυντήριες οδηγίες UNEP/SETAC και την επικαιροποίηση του 2020, οι οποίες οργανώνουν την ανάλυση με βάση ομάδες

ενδιαφερόμενων μερών και επιτρέπουν ποιοτική ή ημι-ποσοτική βαθμολόγηση όταν τα πρωτογενή δεδομένα είναι περιορισμένα (UNEP/SETAC, 2009; UNEP, 2020).

Οι δείκτες αντιστοιχίστηκαν σε τέσσερις βασικές ομάδες ενδιαφερόμενων μερών: εργαζόμενοι, τοπική κοινότητα, καταναλωτές και κοινωνία/δημόσιο συμφέρον. Η μήτρα αξιολόγησης συμπληρώθηκε με βάση στοιχεία της Μελέτης Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων του έργου, καθώς και εξωτερικά πρότυπα, κανονισμούς και βιβλιογραφία του κλάδου, ώστε να καθοριστούν ελάχιστα επίπεδα επίδοσης και κριτήρια βέλτιστης πρακτικής.

5.2.2. Ευρήματα ανά ομάδα ενδιαφερόμενων μερών

Η παρούσα ενότητα συνοψίζει τις βασικές κοινωνικές επιπτώσεις και τους κύριους κινδύνους που εντοπίζονται κατά μήκος της αλυσίδας αξίας της υδατοκαλλιέργειας, με έμφαση στους εργαζόμενους, την τοπική κοινότητα, τους καταναλωτές και την κοινωνία συνολικά.

1. Εργαζόμενοι

Η υγεία και ασφάλεια των εργαζομένων αποτελεί βασική κοινωνική παράμετρο, καθώς η εργασία σε θαλάσσιους κλωβούς συνδέεται με έκθεση σε καιρικές συνθήκες, υγρά και ψυχρά περιβάλλοντα, χειρωνακτική εργασία και χρήση εξοπλισμού. Το προφίλ κινδύνου μπορεί να θεωρηθεί μεσαίου επιπέδου, εφόσον δεν εφαρμόζονται στοχευμένα μέτρα πρόληψης. Η διεθνής βιβλιογραφία για την υδατοκαλλιέργεια καταγράφει κινδύνους όπως ολισθήσεις, πτώσεις, μυοσκελετικές καταπονήσεις, τραυματισμούς, ψυχρό στρες και πνιγμό, γεγονός που αναδεικνύει την ανάγκη για ειδικές εκτιμήσεις κινδύνου ανά εργασία, επαναλαμβανόμενη εκπαίδευση και παρακολούθηση δεικτών ασφάλειας, όπως LTIR, αναφορές παρ' ολίγον ατυχημάτων και ώρες εκπαίδευσης ανά εργαζόμενο (Lloyd's Register Foundation, 2021; Makri, 2024).

Σε σχέση με τους μισθούς και τη σταθερότητα εργασίας, οι επιπτώσεις αξιολογούνται θετικά, καθώς η μεσογειακή υδατοκαλλιέργεια συμβάλλει στη δημιουργία σταθερών θέσεων εργασίας σε παράκτιες περιοχές (STECF, 2024). Ωστόσο, για την πληρέστερη τεκμηρίωση της έννοιας των «δίκαιων μισθών», προτείνεται περιοδική σύγκριση με περιφερειακά μισθολογικά στοιχεία και δείκτες μισθού διαβίωσης, σύμφωνα με τις κατευθύνσεις του UNEP (2020).

2. Τοπική κοινότητα

Η υδατοκαλλιέργεια μπορεί να συμβάλει θετικά στην τοπική οικονομία μέσω άμεσων και έμμεσων θέσεων εργασίας που συνδέονται με τις θαλάσσιες λειτουργίες, τη συντήρηση, την εφοδιαστική και τη συσκευασία. Η συμβολή αυτή ενισχύει το τοπικό εισόδημα και την οικονομική ανθεκτικότητα παράκτιων περιοχών, στοιχείο που είναι συμβατό με τις οικονομικές αναφορές για την ευρωπαϊκή υδατοκαλλιέργεια και το περιφερειακό πλαίσιο της Μεσογείου (STECF, 2024 ; FAO/GFCM, 2023).

Παράλληλα, η δραστηριότητα μπορεί να προκαλέσει ανησυχίες στην τοπική κοινότητα, κυρίως σχετικά με τις θαλάσσιες επιπτώσεις, τον βενθικό εμπλουτισμό, τις διαφυγές, τη ναυσιπλοΐα και τη χρήση του παράκτιου χώρου. Για τον λόγο αυτό, η διαφάνεια και η επικοινωνία με την τοπική κοινωνία είναι κρίσιμες. Οι οδηγίες UNEP τονίζουν τη σημασία προσβάσιμων μηχανισμών υποβολής παραπόνων και δημόσιας δημοσιοποίησης δεικτών παρακολούθησης, ως μέρος της κοινωνικής άδειας λειτουργίας (UNEP, 2020). Ενδεικτικοί δείκτες παρακολούθησης είναι ο αριθμός αιτημάτων της κοινότητας που επιλύονται και η δημοσίευση στοιχείων για την ποιότητα νερού και τα περιβαλλοντικά συμβάντα.

3. Καταναλωτές

Για τους καταναλωτές, οι βασικές κοινωνικές παράμετροι αφορούν την ποιότητα, την ασφάλεια και την ιχνηλασιμότητα του προϊόντος. Οι λειτουργίες συσκευασίας πρέπει να βασίζονται σε σύστημα ασφάλειας τροφίμων τύπου HACCP, όπως προβλέπεται από τον Κανονισμό (ΕΚ) 852/2004, ο οποίος καθορίζει απαιτήσεις υγιεινής και ελέγχου για τις επιχειρήσεις τροφίμων (European Commission, 2004). Η τακτική επαλήθευση της υγιεινής, του ελέγχου θερμοκρασίας και της περιβαλλοντικής παρακολούθησης ενισχύει τη θετική αξιολόγηση της ασφάλειας προϊόντος.

Η ιχνηλασιμότητα αποτελεί επίσης κρίσιμο στοιχείο. Η ευρωπαϊκή νομοθεσία απαιτεί ιχνηλασιμότητα «ένα βήμα πίσω - ένα βήμα μπροστά» για τα τρόφιμα και τις ζωοτροφές, σύμφωνα με τον Κανονισμό 178/2002, Άρθρο 18. Επιπλέον, για τα προϊόντα υδατοκαλλιέργειας που διατίθενται στην αγορά της ΕΕ απαιτείται πληροφόρηση των καταναλωτών, όπως εμπορική ονομασία, μέθοδος παραγωγής και περιοχή παραγωγής, σύμφωνα με τον Κανονισμό 1379/2013 (EU, 2013). Η σύνδεση σε επίπεδο παρτίδας, από τον κλωβό ή την παρτίδα συγκομιδής έως τη συσκευασμένη μονάδα, μπορεί να ενισχύσει την ετοιμότητα ανάκλησης και την εμπιστοσύνη των

καταναλωτών. Προτεινόμενοι δείκτες είναι το ποσοστό παρτίδων με πλήρη ψηφιακή ιχνηλασιμότητα και η επιτυχία δοκιμαστικών ασκήσεων ανάκλησης.

4. Κοινωνία / Δημόσιο συμφέρον

Σε επίπεδο κοινωνίας, η θαλάσσια υδατοκαλλιέργεια συμβάλλει στην επισιτιστική ασφάλεια, αυξάνοντας τη διαθεσιμότητα ιχθυοπρωτεΐνης σε περιφερειακό επίπεδο. Η συμβολή αυτή θεωρείται θετική, ιδιαίτερα όταν συνοδεύεται από περιβαλλοντικές διασφαλίσεις, διατήρηση της ποιότητας του προϊόντος και προσαρμογή στις ανάγκες της αγοράς (FAO/GFCM, 2023).

Παράλληλα, η χρήση δημόσιου θαλάσσιου χώρου έχει μέτρια κοινωνική σημασία, καθώς συνδέεται με ζητήματα χωρικού σχεδιασμού, ναυσιπλοΐας και συνύπαρξης με άλλες δραστηριότητες. Το πλαίσιο S-LCA του UNEP υπογραμμίζει την ανάγκη σεβασμού των δικαιωμάτων των κοινοτήτων και των χρηστών του χώρου, καθώς και την τεκμηρίωση της συμμόρφωσης με τον χωρικό σχεδιασμό και τους κανόνες ασφάλειας ναυσιπλοΐας (UNEP, 2020). Ενδεικτικοί δείκτες παρακολούθησης είναι τα ευρήματα συμμόρφωσης από τις αρμόδιες αρχές και ο αριθμός ή τα αποτελέσματα των διαβουλεύσεων με ενδιαφερόμενα μέρη.

5.2.3. Μεθοδολογική σημείωση και ποιότητα δεδομένων

Πραγματοποιήθηκε προκαταρκτική Κοινωνική Αξιολόγηση Κύκλου Ζωής (screening Social Life Cycle Assessment, Type I-II) με χρήση Microsoft Excel, ώστε να διασφαλιστούν η διαφάνεια και η αναπαραγωγιμότητα. Η αξιολόγηση ακολουθεί το πλαίσιο UNEP/SETAC (2009) και την επικαιροποίηση UNEP (2020). Οι ομάδες ενδιαφερόμενων μερών και οι υποκατηγορίες ορίστηκαν ως εξής: Εργαζόμενοι — εργασιακές συνθήκες, επαγγελματική υγεία και ασφάλεια· Τοπική Κοινότητα — οικονομική συνεισφορά, περιβαλλοντικές ανησυχίες/αποδοχή· Καταναλωτές — ποιότητα και ασφάλεια προϊόντος, ιχνηλασιμότητα και πληροφόρηση· και Κοινωνία/Δημόσιο Συμφέρον — συμβολή στην επισιτιστική ασφάλεια, χρήση θαλάσσιου χώρου. Οι παραπάνω συμπληρώθηκαν από μια οριζόντια κατηγορία σχετικά με την ισότητα φύλων και τη μη διάκριση.

Τα επίπεδα βάσης ορθής πρακτικής αντλήθηκαν από τις οδηγίες UNEP και από τη σχετική νομοθεσία της ΕΕ που ρυθμίζει το δίκαιο τροφίμων, την υγιεινή και την πληροφόρηση των καταναλωτών, δηλαδή τους Κανονισμούς 178/2002, 852/2004 και

1379/2013. Το κλαδικό πλαίσιο και τα τεκμήρια κινδύνου συγκεντρώθηκαν από τις πηγές STECF (2024), FAO/GFCM (2023), Lloyd's Register Foundation (2021) και Makri (2024).

***Πίνακας 4**: Απογραφή για την S-LCA. Πηγή: ιδία επεξεργασία με βάση RAE (2024), Fuelprices.gr (2024), ΕΥΔΑΠ (2024), EUMOFA, EU Fish Feed Market Reports (2024), Henriksson PJG et al. (2015).*

Stakeholder Group	Social Impact Category	Qualitative Assessment
Workers	Health & Safety	Medium risk (exposure to weather, manual handling)
Workers	Fair Wages / Job Stability	Positive — Local employment provided
Local Community	Economic Contribution	Positive — Direct and indirect jobs created
Local Community	Environmental Concerns	Medium — Possible concerns regarding marine impacts
Consumers	Product Quality & Safety	Positive — Hygiene and food safety practices in place
Consumers	Product Traceability	No data → Likely limited traceability systems
Society / Public	Contribution to Food Security	Positive — Supplies sustainable fish protein
Society / Public	Use of Marine Space	Moderate — Utilizes public marine space for farming

Οι δείκτες βαθμολογήθηκαν σε πενταβάθμια ποιοτική κλίμακα (−−, −, 0, +, ++), όπου το 0 δηλώνει συμμόρφωση με τη βασική ορθή πρακτική. Κάθε βαθμολογία συνοδεύεται από επίπεδο τεκμηρίωσης —A (επαληθευμένο/τεκμηριωμένο), B (εσωτερικά αρχεία/συνεντεύξεις) ή C (κρίση ειδικού)— και αναφέρονται μέσοι όροι σε επίπεδο ενδιαφερόμενων μερών με εύρη αβεβαιότητας ανά επίπεδο τεκμηρίωσης. Η συγκέντρωση των αποτελεσμάτων παραμένει ποιοτική· δεν πραγματοποιείται κοινωνική χρηματική αποτίμηση. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται σε πίνακες τύπου traffic-light και spider charts, επισημαίνοντας κρίσιμα σημεία, δηλαδή βαθμολογία < 0 με τεκμηρίωση επιπέδου A ή B, και σημεία παρακολούθησης, δηλαδή βαθμολογία = 0 με τεκμηρίωση επιπέδου C. Οι βασικοί περιορισμοί περιλαμβάνουν περιορισμένο βάθος ελέγχου, χωρίς συστηματικούς ελέγχους προμηθευτών, εξάρτηση από δευτερογενή στατιστικά στοιχεία για το πλαίσιο αναφοράς και πιθανή υποεκπροσώπηση άτυπης/εποχικής εργασίας σε ανάντη στάδια· οι επιφυλάξεις αυτές συνοδεύουν τα αποτελέσματα και ενημερώνουν τον οδικό χάρτη βελτίωσης. Προαιρετικά, μπορεί να υπολογιστεί ένας σύνθετος Δείκτης Κοινωνικής Επίδοσης (Social Performance Index - SPI) (function1) ως σταθμισμένη συγκέντρωση των

βαθμολογιών υποκατηγοριών, με βάρη που αντανακλούν τη σημασία τους στη λήψη αποφάσεων, ώστε να παραχθεί ένας κανονικοποιημένος SPI (Dunuwila et al., 2025; Alanis et al., 2025; Greco et al., 2019).

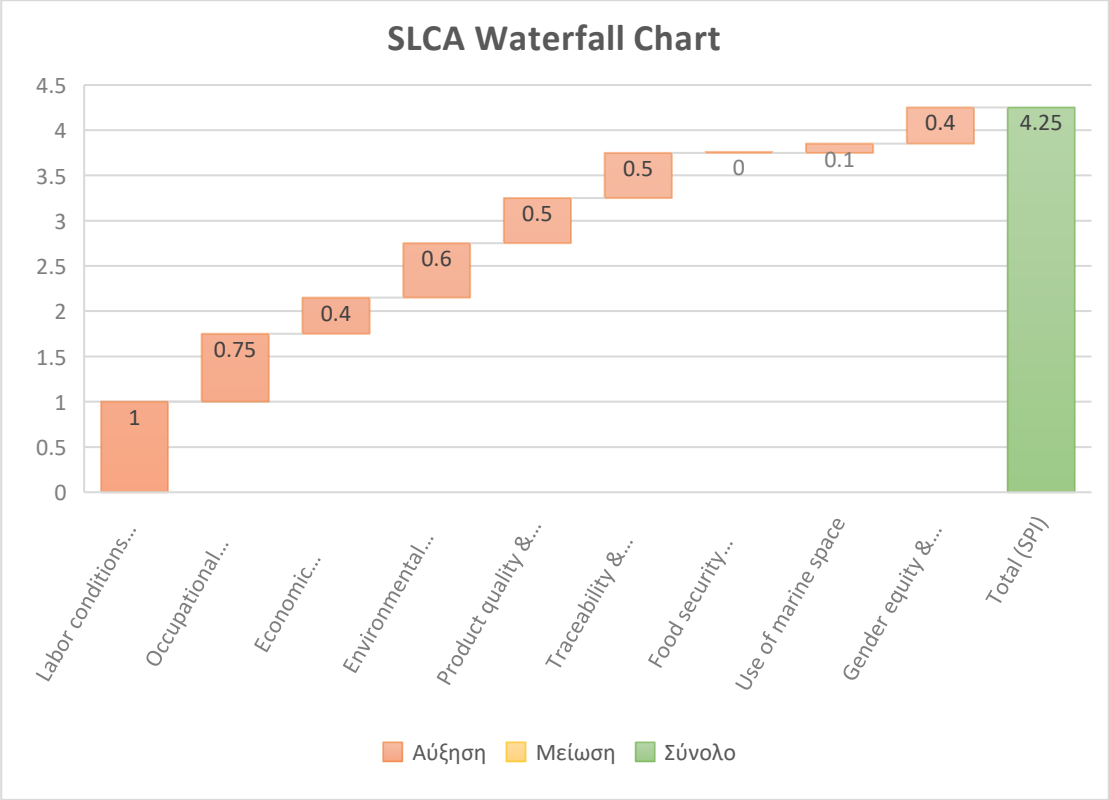
$\mathrm{SPI} = \frac{\sum_i (\mathrm{Score}_i \times \mathrm{Weight}_i)}{\sum_i \mathrm{Weight}_i}$	(2)

Όλοι οι υπολογισμοί πραγματοποιήθηκαν στο Microsoft Excel για λόγους ιχνηλασιμότητας και περιλάμβαναν: (i) έναν πίνακα βαθμολόγησης με ενσωματωμένες σημειώσεις τεκμηρίωσης· (ii) ένα διάγραμμα waterfall που οπτικοποιεί τη συμβολή των υποκατηγοριών (Score × Weight) και το συνολικό αποτέλεσμα (SPI) (Εικόνα 9)· και (iii) μια προαιρετική ανακλιμάκωση από 0 έως 5, με τιμή βάσης 2,5, για σκοπούς επικοινωνίας, χρησιμοποιώντας τη γραμμική αντιστοίχιση 0-5 = 1,25 × (old + 2) (UNEP, 2020).

Πίνακας 5*: Δεδομένα υπολογισμού για τον SPI, ιδία επεξεργασία*

Sub-category	***Weighted Score***	***Score (1 to 5)***	***Weight***	***SPI***
Labor conditions (wages, contracts, job stability)	*1*	*5*	*0.2*	*0.545588*
Occupational health & safety (OHS)	*0.75*	*5*	*0.15*	*0.467241*
Economic contribution	*0.4*	*4*	*0.1*	*0.408333*
Environmental concerns / acceptance	*0.6*	*4*	*0.15*	*0.41*
Product quality & safety	*0.5*	*4*	*0.125*	*0.3625*
Traceability & information	*0.5*	*4*	*0.125*	*0.316667*

Food security contribution	*0*	*2*	*0*	*0.225*
Use of marine space	*0.1*	*2*	*0.05*	*0.3*
Gender equity & non-discrimination	*0.4*	*4*	*0.1*	*0.4*
Total (SPI)	*4.25*		*1*	



Εικόνα 10: *Διάγραμμα waterfall για την S-LCA*

5.2.4 Αποτελέσματα και ερμηνεία

Ο υπολογισμένος Δείκτης Κοινωνικής Επίδοσης (Social Performance Index - SPI) ανέρχεται σε περίπου 1,20 στην κλίμακα −2 έως +2, γεγονός που υποδηλώνει μέτρια θετική κοινωνική επίδοση, με περιθώρια περαιτέρω βελτίωσης. Σε κλίμακα παρουσίασης 0-5, η τιμή αυτή αντιστοιχεί σε περίπου 4,01/5, δηλαδή περίπου 80% της μέγιστης δυνατής επίδοσης, βάσει της γραμμικής αντιστοίχισης που εφαρμόστηκε.

Το διάγραμμα waterfall δείχνει ότι οι μεγαλύτερες θετικές συνεισφορές προέρχονται από τις εργασιακές συνθήκες και την επαγγελματική υγεία και ασφάλεια (Occupational Health and Safety - OHS). Οι εργασιακές συνθήκες συνεισφέρουν θετικά, κυρίως λόγω της επίσημης απασχόλησης και της σταθερότητας εργασίας, ωστόσο απαιτείται περαιτέρω τεκμηρίωση για δίκαιους μισθούς και σύγκριση με περιφερειακά

μισθολογικά δεδομένα, ώστε να αποδεικνύεται επίδοση πέραν της βασικής συμμόρφωσης (UNEP, 2020; STECF, 2024). Αντίστοιχα, η OHS εμφανίζει θετική συνεισφορά, αλλά χρειάζεται συστηματικότερη τεκμηρίωση μέσω ειδικών εκτιμήσεων κινδύνου ανά εργασία, ωρών εκπαίδευσης ανά εργαζόμενο, καταγραφής παρ' ολίγον ατυχημάτων και ελέγχων μέσων ατομικής προστασίας, σύμφωνα με το γνωστό προφίλ κινδύνου του κλάδου της υδατοκαλλιέργειας (Lloyd's Register Foundation, 2021; Makri, 2024).

Η τοπική κοινότητα παρουσιάζει επίσης θετική επίδοση, κυρίως μέσω της οικονομικής συνεισφοράς της δραστηριότητας σε θέσεις εργασίας και εισόδημα, εύρημα που είναι συμβατό με τα δεδομένα για την ευρωπαϊκή και μεσογειακή υδατοκαλλιέργεια (STECF, 2024; FAO/GFCM, 2023). Παράλληλα, η αποδοχή από την κοινότητα και οι περιβαλλοντικές ανησυχίες παραμένουν κρίσιμο πεδίο βελτίωσης. Η δημιουργία δημόσιου μηχανισμού υποβολής παραπόνων και η δημοσίευση σύντομου περιβαλλοντικού dashboard, για παράδειγμα σχετικά με την ποιότητα νερού, τις διαφυγές και τη διαχείριση αποβλήτων, θα μπορούσαν να ενισχύσουν την κοινωνική άδεια λειτουργίας (UNEP, 2020).

Στην ομάδα των καταναλωτών, η ποιότητα, η ασφάλεια προϊόντος, η ιχνηλασιμότητα και η πληροφόρηση αξιολογούνται θετικά, υπό την προϋπόθεση ότι εφαρμόζονται έλεγχοι βασισμένοι στο HACCP και ιχνηλασιμότητα σύμφωνα με το Άρθρο 18. Για την ενίσχυση της τεκμηρίωσης, είναι απαραίτητη η διατήρηση αρχείων επαλήθευσης και ελέγχων, καθώς και η συμμόρφωση της επισήμανσης με τον Κανονισμό 1379/2013 (EU, 2002; EU, 2004; EU, 2013). Η ισότητα φύλων και η μη διάκριση εμφανίζουν θετική βασική επίδοση, αλλά θα μπορούσαν να ενισχυθούν μέσω δημοσίευσης στοιχείων για την κατανομή φύλου, πιθανό μισθολογικό χάσμα και ύπαρξη μηχανισμών κατά της παρενόχλησης (UNEP, 2020; Dir. 2006/54/EC).

Συνολικά, ο SPI δείχνει ότι το σύστημα έχει καλή κοινωνική επίδοση, αλλά οι σημαντικότερες βελτιώσεις θα προέλθουν από την ενίσχυση της τεκμηρίωσης και της εφαρμογής σε τέσσερα πεδία: επαγγελματική υγεία και ασφάλεια, δίκαιοι μισθοί και συμβάσεις, διαφάνεια προς την τοπική κοινότητα και πλήρης ιχνηλασιμότητα του προϊόντος. Επειδή οι εργασιακές συνθήκες και η OHS έχουν τα υψηλότερα βάρη, η βελτίωσή τους αναμένεται να επιφέρει τη μεγαλύτερη αύξηση του SPI. Τέλος, ο δείκτης είναι ευαίσθητος τόσο στις βαθμολογίες όσο και στα βάρη· επομένως, η ανακατανομή

των βαρών, για παράδειγμα προς την κοινότητα ή την ισότητα φύλων, μπορεί να μεταβάλει τις επιμέρους συνεισφορές, διατηρώντας όμως τον SPI συγκρίσιμο μεταξύ σεναρίων (UNEP, 2020).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6. Συζήτηση και Συμπεράσματα

Η παρούσα μελέτη παρουσιάζει μια ολοκληρωμένη Αξιολόγηση Βιωσιμότητας Κύκλου Ζωής (Life-Cycle Sustainability Assessment - LCSA) μιας μεσογειακής αλυσίδας αξίας τσιπούρας, συνδυάζοντας περιβαλλοντική Ανάλυση Κύκλου Ζωής (LCA), χρηματοοικονομική Ανάλυση Κόστους Κύκλου Ζωής (LCC) και μια screening Κοινωνική Ανάλυση Κύκλου Ζωής (S-LCA), μέσα σε μια διαφανή ροή εργασίας βασισμένη στο Excel. Οι τρεις διαστάσεις της ανάλυσης συγκλίνουν ως προς τα κύρια σημεία όπου συγκεντρώνονται οι περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις, οι οικονομικοί κίνδυνοι και οι κοινωνικές προτεραιότητες.

Περιβαλλοντικά, η «πάχυνση» στη μονάδα ιχθυοκαλλιέργειας (Fish Farm) αναδεικνύεται ως το κυρίαρχο κρίσιμο σημείο επιβάρυνσης, ιδίως ως προς τη ζημία ReCiPe endpoint στην ανθρώπινη υγεία και στα οικοσυστήματα. Ακολουθεί σε μικρή απόσταση η ανάντη εφοδιαστική αλυσίδα των ιχθυοτροφών, ενώ τα στάδια της μεταφοράς και του εμπορίου αποκτούν μεγαλύτερη σημασία κυρίως στις κατηγορίες που σχετίζονται με τους πόρους και την ενέργεια. Οι βασικοί μηχανισμοί που οδηγούν τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις είναι η χρήση καυσίμων και ηλεκτρικής ενέργειας κατά την εκτροφή, καθώς και οι εκροές διαλυμένου αζώτου και φωσφόρου, οι οποίες επηρεάζουν κυρίως την κλιματική αλλαγή και τον ευτροφισμό. Παράλληλα, τα ανάντη συστατικά των ιχθυοτροφών συμβάλλουν σημαντικά στη χρήση γης και στην οικοτοξικότητα, σύμφωνα με τη λογική midpoint-to-endpoint της ReCiPe 2016 (ISO 14044, 2006; Huijbregts et al., 2017; PRé Sustainability, 2024).

Οικονομικά, η LCC δείχνει μια ιδιαίτερα συγκεντρωμένη βάση κόστους. Η ιχθυοτροφή αντιπροσωπεύει περίπου το 74% του μεταβλητού κόστους, ενώ τα ιχθύδια περίπου το 19%. Αντίθετα, η ηλεκτρική ενέργεια και τα καύσιμα εμφανίζονται επί του παρόντος ως οριακές κατηγορίες κόστους, με βάση τα διαθέσιμα δεδομένα. Το αποτέλεσμα αυτό είναι συμβατό με τα στοιχεία της μεσογειακής υδατοκαλλιέργειας και υποδεικνύει ότι

οι κύριοι μοχλοί οικονομικής ανθεκτικότητας σε €/kg εντοπίζονται κυρίως στην τροφή και στον γόνο (EUMOFA, 2024; Henriksson et al., 2015). Επομένως, η συνδυασμένη ανάγνωση LCA-LCC αναδεικνύει επιλογές «win-win», ιδίως στη σύνθεση και προμήθεια ιχθυοτροφών, στη διαχείριση ενέργειας στη μονάδα και στην αποδοτικότητα της ψυχρής αλυσίδας.

Κοινωνικά, η screening S-LCA αποδίδει Δείκτη Κοινωνικής Επίδοσης (Social Performance Index - SPI) περίπου 1,2045 στην κλίμακα −2 έως +2, δηλαδή περίπου 4,0/5 μέσω γραμμικής αντιστοίχισης. Το αποτέλεσμα αυτό δείχνει μέτρια θετική κοινωνική επίδοση, με σαφές όμως περιθώριο βελτίωσης τόσο στην τεκμηρίωση όσο και στην πρακτική εφαρμογή. Οι μεγαλύτερες θετικές συνεισφορές προέρχονται από τις εργασιακές συνθήκες και την επαγγελματική υγεία και ασφάλεια (Occupational Health and Safety - OHS), ακολουθούμενες από την τοπική κοινότητα και τους καταναλωτές, ενώ η ισότητα φύλων εμφανίζει θετική επίδοση σε επίπεδο βάσης. Η βαθμολόγηση και ο δείκτης ακολουθούν τις οδηγίες UNEP/SETAC και τη συνήθη πρακτική σταθμισμένης συγκέντρωσης, ενώ πρόσφατες μελέτες S-LCA εφαρμόζουν συγκρίσιμους Δείκτες Κοινωνικής Επίδοσης (UNEP/SETAC, 2009; UNEP, 2020; Greco et al., 2019; Dunuwila et al., 2025; Alanis et al., 2025).

Συνολικά, η μελέτη δείχνει ότι οι τρεις πυλώνες της βιωσιμότητας δεν λειτουργούν ανεξάρτητα, αλλά αλληλοσυνδέονται. Η ιχθυοτροφή αποτελεί χαρακτηριστικό σημείο σύγκλισης της περιβαλλοντικής και οικονομικής διάστασης, καθώς επηρεάζει τόσο το περιβαλλοντικό αποτύπωμα όσο και το κόστος παραγωγής. Παράλληλα, η OHS και οι εργασιακές συνθήκες αναδεικνύονται ως κοινωνικές προτεραιότητες, με τη μεγαλύτερη οριακή δυνατότητα βελτίωσης του SPI. Η ευθυγράμμιση αυτή υποστηρίζει σταδιακές παρεμβάσεις, όπως η αναδιαμόρφωση της ιχθυοτροφής σε συνδυασμό με τη συστηματοποίηση της OHS, οι οποίες μπορούν να ενισχύσουν ταυτόχρονα την περιβαλλοντική, οικονομική και κοινωνική επίδοση, χωρίς να μεταφέρουν το πρόβλημα από τη μία διάσταση στην άλλη (ISO 14044, 2006; Huijbregts et al., 2017; EUMOFA, 2024; UNEP, 2020).

6.1. Συμβολή στον Σχεδιασμό και στη Λήψη Αποφάσεων

Τα ευρήματα της μελέτης έχουν άμεση συνάφεια τόσο με την πολιτική όσο και με τη βιομηχανική πρακτική. Σε επίπεδο ευρωπαϊκής διακυβέρνησης, οι δείκτες που

εξετάστηκαν ευθυγραμμίζονται με τους κανόνες ιχνηλασιμότητας, ασφάλειας τροφίμων και πληροφόρησης των καταναλωτών. Η ιχνηλασιμότητα, σύμφωνα με τον Κανονισμό 178/2002, Άρθρο 18, και η πληροφόρηση των καταναλωτών για προϊόντα υδατοκαλλιέργειας, σύμφωνα με τον Κανονισμό 1379/2013, στηρίζουν τον πυλώνα των καταναλωτών και της διαφάνειας. Παράλληλα, η ασφάλεια τροφίμων, βασισμένη στο HACCP και στον Κανονισμό 852/2004, υποστηρίζει τη βαθμολογία ασφάλειας προϊόντος (EU, 2002; EU, 2004; EU, 2013).

Από την πλευρά της βιομηχανίας, τα κρίσιμα σημεία κόστους επιβεβαιώνουν την ανάγκη προτεραιοποίησης των συμβάσεων ιχθυοτροφών, της ποιότητας του γόνου και της επιβίωσης των ιχθυδίων. Η ιχθυοτροφή, ως βασικός οδηγός τόσο των περιβαλλοντικών επιπτώσεων όσο και του κόστους παραγωγής, αποτελεί κεντρικό πεδίο παρέμβασης για τη βελτίωση της συνολικής βιωσιμότητας. Η τεχνοοικονομική και LCA έρευνα στην υδατοκαλλιέργεια, καθώς και οι αναλύσεις αγοράς της ΕΕ, επιβεβαιώνουν τη σημασία της διαχείρισης τροφής, της αποδοτικότητας παραγωγής και της ανθεκτικότητας απέναντι στις διακυμάνσεις των τιμών (EUMOFA, 2024; Henriksson et al., 2015).

Για τις ρυθμιστικές αρχές και τους φορείς πιστοποίησης, η ενσωματωμένη βάση LCA-LCC-SLCA μπορεί να υποστηρίξει στοχευμένα μέτρα για την ενεργειακή μετάβαση, τον έλεγχο των απωλειών θρεπτικών ουσιών, τα συστήματα διαχείρισης ασφάλειας εργαζομένων και τη διαφάνεια προς την τοπική κοινότητα. Η δημοσιοποίηση βασικών περιβαλλοντικών και κοινωνικών δεδομένων, η ενίσχυση των μηχανισμών παραπόνων και η τεκμηρίωση των πρακτικών ιχνηλασιμότητας μπορούν να συμβάλουν στη βελτίωση της κοινωνικής αποδοχής και της εμπιστοσύνης των καταναλωτών, σύμφωνα με τις οδηγίες UNEP για ενδιαφερόμενα μέρη και δημοσιοποίηση (UNEP/SETAC, 2009; UNEP, 2020).

Οι επιπτώσεις για τη λήψη αποφάσεων είναι σαφείς. Επειδή οι εργασιακές συνθήκες και η επαγγελματική υγεία και ασφάλεια έχουν τα υψηλότερα βάρη στην S-LCA, οι επαληθευμένες βελτιώσεις σε αυτά τα πεδία αποδίδουν τα μεγαλύτερα οριακά κέρδη στον SPI. Παράλληλα, η σύνθεση και προμήθεια της ιχθυοτροφής, η διαχείριση ενέργειας στη μονάδα και η αποδοτικότητα της ψυχρής αλυσίδας κυριαρχούν στον κοινό περιβαλλοντικό-οικονομικό χώρο ευκαιριών. Οι μοχλοί αυτοί επιτρέπουν

παρεμβάσεις που βελτιώνουν ταυτόχρονα την περιβαλλοντική, χρηματοοικονομική και κοινωνική επίδοση, αντί να ενισχύουν μία διάσταση εις βάρος κάποιας άλλης.

6.2. Μεθοδολογική συμβολή

Μεθοδολογικά, η μελέτη εφάρμοσε μια ελέγξιμη και αναπαραγώγιμη προσέγγιση LCSA, βασισμένη σε υπολογιστικό φύλλο. Η προσέγγιση αυτή συνδυάζει τη διάγνωση κρίσιμων σημείων της LCA με την ανάλυση οδηγών κόστους της LCC και έναν σταθμισμένο κοινωνικό δείκτη που βασίζεται σε διαφανή πίνακα βαθμολόγησης. Όλοι οι κανόνες βαθμολόγησης, τα βάρη και οι υπολογισμοί είναι ρητοί, αναπαραγώγιμοι και εύκολα προσαρμόσιμοι σε δοκιμές σεναρίων, όπως σοκ τιμών ιχθυοτροφών, εναλλακτικές συνθέσεις τροφής ή ενεργειακές μεταβάσεις. Ο SPI ακολουθεί τις συνήθεις αρχές σύνθετων δεικτών, με σαφή στάθμιση και κανονικοποίηση, επιτρέποντας στους αναγνώστες να δουν πώς οι βαθμολογίες των κατηγοριών συγκεντρώνονται σε έναν ενιαίο και επικοινωνήσιμο δείκτη.

Στο περιβαλλοντικό σκέλος της ανάλυσης, η εφαρμογή της LCA οργανώθηκε με τρόπο που να ενισχύει τόσο την αξιοπιστία όσο και την ερμηνευσιμότητα των αποτελεσμάτων. Αρχικά υπολογίστηκαν οι midpoint δείκτες με τις μεθόδους ReCiPe 2016 και CML-IA, χρησιμοποιώντας το ίδιο σύνολο απογραφής, ώστε να ελεγχθεί η σταθερότητα των κρίσιμων σημείων και η συνέπεια των αποτελεσμάτων σε επίπεδο περιβαλλοντικών μηχανισμών, σύμφωνα με τις απαιτήσεις του ISO 14044. Στη συνέχεια, τα endpoint αποτελέσματα της ReCiPe 2016 χρησιμοποιήθηκαν για τη σύνθεση των επιπτώσεων σε ευρύτερες κατηγορίες ζημίας, όπως η ανθρώπινη υγεία, τα οικοσυστήματα και οι πόροι, διευκολύνοντας την επικοινωνία των αποτελεσμάτων και την υποστήριξη της λήψης αποφάσεων. Τα στάδια της κανονικοποίησης, της στάθμισης και του single score αξιοποιήθηκαν επικουρικά, για λόγους διαφάνειας και διασταυρωτικού ελέγχου, χωρίς να αποτελούν τη μοναδική βάση για την εξαγωγή των βασικών συμπερασμάτων. Όλοι οι υπολογισμοί πραγματοποιήθηκαν στο SimaPro, με χρήση των μεθόδων όπως τεκμηριώνονται από την PRé Sustainability, ενώ οι απογραφές υποβάθρου συνδέθηκαν με τη βάση ecoinvent v3, με σύστημα allocation, cut-off by classification, ώστε να διασφαλιστεί συνεπής ανάντη μοντελοποίηση για τις ιχθυοτροφές, την ενέργεια, τη συσκευασία και τη μεταφορά. Η συγκεκριμένη attributional διαμόρφωση θεωρείται κατάλληλη για μελέτες LCA υδατοκαλλιεργειών, καθώς επιτρέπει την αποτύπωση των βασικών σταδίων που συνήθως κυριαρχούν στις

midpoint κατηγορίες, όπως η τροφή, οι εκπομπές στη μονάδα, η συσκευασία και η ψυχρή εφοδιαστική αλυσίδα.

Παρά τη χρησιμότητα της προσέγγισης, αρκετοί περιορισμοί μετριάζουν τα ευρήματα. Πρώτον, ορισμένες εισροές προσκηνίου, όπως η ηλεκτρική ενέργεια της φορτηγίδας και η ψύξη κατά τη διανομή, βασίζονται σε τεχνικές εκτιμήσεις έως ότου καταστούν διαθέσιμες άμεσες μετρήσεις. Παράλληλα, οι διεργασίες υποβάθρου βασίζονται σε τυποποιημένα υποκατάστατα βάσεων δεδομένων. Οι επιλογές αυτές μπορεί να επηρεάζουν τα απόλυτα μεγέθη των αποτελεσμάτων, ωστόσο δεν φαίνεται να μεταβάλλουν την κατάταξη των κρίσιμων σημείων, η οποία παραμένει σταθερή μεταξύ των μεθόδων και των διαφορετικών προοπτικών ReCiPe (ISO 14044, 2006; Huijbregts et al., 2017; PRé Sustainability, 2024).

Δεύτερον, η LCC αντανακλά μια χρηματοοικονομική οπτική του φορέα εκμετάλλευσης και εστιάζει κυρίως στις λειτουργικές δαπάνες. Οι αποσβέσεις κεφαλαιουχικών δαπανών (Capital Expenditures - CAPEX), η εργασία, τα γενικά έξοδα και η χρηματοδότηση εξαιρούνται, εκτός εάν έχουν ενσωματωθεί στις μοναδιαίες τιμές. Συνεπώς, τα συμπεράσματα της LCC αφορούν κυρίως τη λειτουργική ανθεκτικότητα και τις σχετικές συγκρίσεις κόστους και όχι μια πλήρη ανάλυση κερδοφορίας (Hunkeler et al., 2008).

Τρίτον, η S-LCA αποτελεί screening αξιολόγηση και, επομένως, είναι ποιοτική/ημι-ποσοτική. Οι βαθμολογίες εξαρτώνται από το βάθος της διαθέσιμης τεκμηρίωσης και από την επιλογή βαρών. Επειδή οι σύνθετοι δείκτες είναι ευαίσθητοι στη στάθμιση και στη συγκέντρωση, η διαφάνεια, οι έλεγχοι ανθεκτικότητας και η μελλοντική εμπλουτισμένη τεκμηρίωση είναι απαραίτητοι (UNEP, 2020; Greco et al., 2019). Η διαφάνεια των πινάκων μειώνει τον περιορισμό αυτό, αλλά δεν τον αναιρεί πλήρως.

Τέταρτον, η εξωτερική εγκυρότητα των αποτελεσμάτων πρέπει να εξεταστεί με προσοχή. Τα ευρήματα αντανακλούν μια μεσογειακή περίπτωση καλλιέργειας τσιπούρας. Παρότι απαιτείται προσοχή κατά τη μεταφορά τους σε άλλα είδη, τεχνολογίες ή γεωγραφικές περιοχές, το πρότυπο Farm > Feed ≫ others αναφέρεται ευρέως για την περιφερειακή υδατοκαλλιέργεια ιχθύων (Henriksson et al., 2015; FAO/GFCM, 2023).

Ιδιαίτερη προσοχή απαιτούν τρεις επιμέρους πηγές αβεβαιότητας. Η πρώτη αφορά τη μεταβλητότητα των δεδομένων υποβάθρου, καθώς τα αποτελέσματα εξαρτώνται από

τις παραδοχές του μοντέλου συστήματος της ecoinvent και από τα datasets των συστατικών ιχθυοτροφής (ecoinvent Association, 2024). Η δεύτερη αφορά τις διαφορές στον χαρακτηρισμό οικοτοξικότητας, καθώς τα μοντέλα οικοτοξικότητας διαφέρουν μεταξύ των μεθόδων LCIA, επηρεάζοντας το μέγεθος και την ορατότητα των κορυφών θαλάσσιας υδατικής οικοτοξικότητας (PRé Sustainability, 2023). Η τρίτη αφορά την κατανομή ενέργειας της ψυχρής αλυσίδας, καθώς η κατανομή της ηλεκτρικής ενέργειας ψύξης μεταξύ διανομής και λιανικής επηρεάζει τις κορυφές midpoint στις κατηγορίες Transport/Trade (ISO 14044; PRé Sustainability, 2023).

6.3. Προτάσεις βελτίωσης

Με βάση τα αποτελέσματα της ολοκληρωμένης αξιολόγησης, οι προτάσεις βελτίωσης μπορούν να οργανωθούν σε έξι βασικές προτεραιότητες.

Πρώτη προτεραιότητα αποτελεί η στρατηγική διαχείρισης της ιχθυοτροφής, η οποία λειτουργεί ταυτόχρονα ως περιβαλλοντικός και οικονομικός μοχλός. Η συν-βελτιστοποίηση του δείκτη μετατρεψιμότητας τροφής (FCR) και της σύνθεσης της ιχθυοτροφής, για παράδειγμα μέσω εναλλακτικών πρωτεϊνών και λιπιδίων με χαμηλότερο αποτύπωμα γης και νερού, μπορεί να μειώσει τόσο τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις όσο και το κόστος παραγωγής. Παράλληλα, η διαφοροποίηση προμηθευτών και η χρήση συμβολαίων μπορούν να περιορίσουν τον κίνδυνο τιμών. Η ιχθυοτροφή παραμένει ο δομικός οδηγός τόσο των επιπτώσεων όσο και του κόστους (EUMOFA, 2024; Henriksson et al., 2015).

Δεύτερη προτεραιότητα είναι η βελτίωση της ενεργειακής διαχείρισης στη μονάδα και ο περιορισμός των απωλειών θρεπτικών ουσιών. Η μείωση της εξάρτησης από γεννήτριες, μέσω σύνδεσης με το δίκτυο ή μέσω υβριδικών συστημάτων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, μπορεί να περιορίσει τις ενεργειακές επιπτώσεις. Παράλληλα, η αποδοτικότερη λειτουργία των σκαφών, η σίτιση ακριβείας και η συστηματική συντήρηση των διχτυών μπορούν να μειώσουν τις απώλειες θρεπτικών ουσιών που συμβάλλουν στον ευτροφισμό (ISO 14044, 2006; Huijbregts et al., 2017).

Τρίτη προτεραιότητα είναι η ενίσχυση της επαγγελματικής υγείας και ασφάλειας. Η συστηματοποίηση ενός συστήματος OHS, με ειδικές ανά εργασία εκτιμήσεις κινδύνου, παρακολούθηση ωρών εκπαίδευσης ανά ισοδύναμο πλήρους απασχόλησης, ελέγχους μέσων ατομικής προστασίας και μάθηση από συμβάντα ή παρ’ ολίγον ατυχήματα, μπορεί να ενισχύσει σημαντικά τον SPI. Η προτεραιότητα αυτή αντανακλά τους

γνωστούς κινδύνους του κλάδου της υδατοκαλλιέργειας και την ανάγκη συστηματικής πρόληψης (Lloyd's Register Foundation, 2021; Makri, 2024).

Τέταρτη προτεραιότητα είναι η διαφάνεια προς την τοπική κοινότητα και η ενίσχυση της εμπιστοσύνης των καταναλωτών. Η δημοσίευση ενός σύντομου περιβαλλοντικού dashboard, το οποίο θα περιλαμβάνει ενδεικτικά στοιχεία για την ποιότητα νερού, τις διαφυγές, τη διαχείριση αποβλήτων και την περιβαλλοντική παρακολούθηση, μπορεί να βελτιώσει τη σχέση με την τοπική κοινωνία. Παράλληλα, η ύπαρξη μηχανισμού υποβολής παραπόνων, η τεκμηρίωση της ιχνηλασιμότητας σύμφωνα με το Άρθρο 18, η συμμόρφωση με την επισήμανση σύμφωνα με τον Κανονισμό 1379/2013 και η διατήρηση αρχείων επαλήθευσης HACCP μπορούν να ενισχύσουν την κοινωνική άδεια λειτουργίας και την εμπιστοσύνη των καταναλωτών (EU, 2002; EU, 2004; EU, 2013; UNEP, 2020).

Πέμπτη προτεραιότητα είναι η ανάπτυξη συστημάτων δεδομένων. Η συστηματική μέτρηση της ηλεκτρικής ενέργειας και των καυσίμων στη μονάδα, η ψηφιοποίηση της ιχνηλασιμότητας και η παρακολούθηση τοπικών προμηθειών και θέσεων εργασίας μπορούν να ενισχύσουν τόσο την τεκμηρίωση της LCC όσο και της S-LCA. Ταυτόχρονα, μπορούν να καταστήσουν δυνατή τη δοκιμή σεναρίων και τη συνεχή παρακολούθηση της προόδου (Hunkeler et al., 2008; UNEP, 2020).

Έκτη προτεραιότητα αφορά τις μελλοντικές επαναλήψεις της αξιολόγησης. Σε επόμενα στάδια, η screening S-LCA μπορεί να εξελιχθεί σε πιο ποσοτική παρακολούθηση, ενσωματώνοντας δείκτες όπως ο δείκτης ατυχημάτων με απώλεια χρόνου εργασίας (LTIR), οι ώρες εκπαίδευσης ανά ισοδύναμο πλήρους απασχόλησης, ο δείκτης μισθού διαβίωσης και το ποσοστό πλήρως ιχνηλάσιμων παρτίδων. Τα δεδομένα αυτά μπορούν να τριγωνοποιηθούν με έρευνες εργαζομένων και τοπικής κοινότητας, όπως συνιστάται από το UNEP (2020). Επιπλέον, η παρακολούθηση κοινωνικοοικονομικών αποτελεσμάτων, μέσω δεικτών STECF για θέσεις εργασίας και εισόδημα, μπορεί να τεκμηριώσει καλύτερα την τοπική συνεισφορά της υδατοκαλλιέργειας και να συνδέσει τα αποτελέσματα με το ευρύτερο αφήγημα επισιτιστικής ασφάλειας για τη Μεσόγειο (STECF, 2024; FAO/GFCM, 2023).

Κοιτάζοντας προς το μέλλον, τα αποτελέσματα υποδεικνύουν ένα πρακτικό σχέδιο δράσης. Περιβαλλοντικά και οικονομικά, η στρατηγική ιχθυοτροφών είναι καθοριστική: η συν-βελτιστοποίηση του FCR και της σύνθεσης, με στόχο τη μείωση

των ανάντη επιβαρύνσεων, ενώ ταυτόχρονα αντισταθμίζεται ο κίνδυνος τιμών μέσω διαφοροποίησης προμηθευτών και συμβολαίων, προσφέρει τα μεγαλύτερα συνδυασμένα οφέλη χωρίς να θυσιάζεται η ανάπτυξη ή η ποιότητα. Στη μονάδα, η μείωση της εξάρτησης από γεννήτριες μέσω σύνδεσης με το δίκτυο ή υβριδικών ανανεώσιμων πηγών, σε συνδυασμό με αυστηρότερη σίτιση ακριβείας και συντήρηση διχτυών, αντιμετωπίζει άμεσα τις επιπτώσεις που σχετίζονται με τον ευτροφισμό και την ενέργεια. Κοινωνικά, η θέσπιση επίσημου συστήματος διαχείρισης OHS με ειδικές ανά εργασία εκτιμήσεις κινδύνου, τεκμηριωμένη εκπαίδευση, επαλήθευση μέσων ατομικής προστασίας και μάθηση από παρ' ολίγον ατυχήματα θα βελτιώσει την επίδοση εκεί όπου επηρεάζει περισσότερο τον SPI.

Με βάση τη λογική της αξιολόγησης κύκλου ζωής, η χωροθέτηση των μονάδων υδατοκαλλιέργειας δεν θα πρέπει να βασίζεται μόνο σε τεχνικά ή παραγωγικά χαρακτηριστικά, αλλά σε ένα περιορισμένο και σαφές σύστημα κριτηρίων βιωσιμότητας. Τα βασικά κριτήρια που μπορούν να προταθούν είναι: α) το περιβαλλοντικό αποτύπωμα κύκλου ζωής της μονάδας, β) η φέρουσα ικανότητα και οικολογική καταλληλότητα της περιοχής, γ) η οικονομική αποδοτικότητα της λειτουργίας σε σχέση με μεταφορές, υποδομές και ενεργειακές ανάγκες, και δ) η κοινωνική συμβατότητα της μονάδας με τις τοπικές δραστηριότητες και την αποδοχή από την τοπική κοινωνία. Με τον τρόπο αυτό, η χωροθέτηση μπορεί να λειτουργήσει ως εργαλείο πρόληψης και όχι μόνο ως διοικητική διαδικασία αδειοδότησης, καθώς συνδέει την περιβαλλοντική προστασία, την οικονομική βιωσιμότητα και την κοινωνική αποδοχή σε ένα ενιαίο πλαίσιο λήψης αποφάσεων.

7. Βιβλιογραφία

Alanis, C., et al. (2025). Integrating environmental and social life cycle assessment for public transport services. *Sustainability, 17*(16), 7456.

Aquaculture Stewardship Council. (2025). *The ASC Farm Standard*. ASC International.

Aubin, J. (2024). *Life cycle assessment applied to aquaculture* [Seminar material, Can Tho University]. HAL Open Archive. https://hal.inrae.fr/hal-04630035

Badiola, M., Basurko, O. C., Piedrahita, R., Hundley, P., & Mendiola, D. (2018). Energy use in recirculating aquaculture systems (RAS): A review. *Aquacultural Engineering, 81*, 57-70.

Benoît-Norris, C., Vickery-Niederman, G., Valdivia, S., Franze, J., Traverso, M., Ciroth, A., & Mazijn, B. (2011). Introducing the UNEP/SETAC methodological sheets for subcategories of social LCA. *The International Journal of Life Cycle Assessment, 16*(7), 682-690.

Biswas, G., Kumar, P., Ghoshal, T. K., Kailasam, M., De, D., Bera, A., Mandal, B., Sukumaran, K., & Vijayan, K. K. (2020). Integrated multi-trophic aquaculture (IMTA) outperforms conventional polyculture with respect to environmental remediation, productivity and economic return in brackishwater ponds. *Aquaculture, 516*, 734626.

Boardman, A. E., Greenberg, D. H., Vining, A. R., & Weimer, D. L. (2006). *Cost-benefit analysis: Concepts and practice* (2nd ed.). Spon Press.

Bohnes, F. A., Hauschild, M. Z., Schlundt, J., & Laurent, A. (2019). Life cycle assessments of aquaculture systems: A critical review of reported findings with recommendations for policy and system development. *Reviews in Aquaculture, 11*(4), 1061-1079. https://doi.org/10.1111/raq.12280

Cabello, F. C. (2006). Heavy use of prophylactic antibiotics in aquaculture: A growing problem for human and animal health and for the environment. *Environmental Microbiology, 8*(7), 1137-1144.

Carr, J. A., Petrokofsky, G., Spracklen, D. V., Lewis, S. L., Roe, D., Trull, N., Vidal, A., Wicander, S., Worthington-Hill, J., & Sallu, S. M. (2021). *Anticipated impacts of achieving SDG targets on forests: A review*. Forest Policy and Economics, 126, 102423. https://doi.org/10.1016/j.forpol.2021.102423

Carroll, M. L., Cochrane, S., Fieler, R., Velvin, R., & White, P. (2003). Organic enrichment of sediments from salmon farming in Norway: Environmental factors, management practices, and monitoring techniques. *Aquaculture, 226*(1-4), 165-180.

Chentouf, S., Sebbah, B., Bahousse, E. H., Wahbi, M., & Maâtouk, M. (2023). GIS-based multi-criteria evaluation (MCE) methods for aquaculture site selection: A systematic review and meta-analysis. *ISPRS International Journal of Geo-Information, 12*(10), 439.

Cherian, T., Sharma, A., & Thakur, S. D. (2023). A review on the fate, human health and environmental impacts as well as regulation of antibiotics used in aquaculture. *Environmental Advances, 13*, 100403.

Chopin, T., Cooper, J. A., Reid, G., Cross, S., & Moore, C. (2012). Open-water integrated multi-trophic aquaculture: Environmental biomitigation and economic diversification of fed aquaculture by extractive aquaculture. *Reviews in Aquaculture, 4*(4), 209-220.

Dekker, E., Zijp, M. C., van de Kamp, M., Temme, E. H. M., & van Zelm, R. (2019). A taste of the new ReCiPe for life cycle assessment: Consequences of the updated impact assessment method on food product LCAs. *The International Journal of Life Cycle Assessment, 24*(3), 547-559. https://doi.org/10.1007/s11367-019-01653-3

Diaz, R. J., & Rosenberg, R. (2008). Spreading dead zones and consequences for marine ecosystems. *Science, 321*(5891), 926-929.

Dunuwila, et al. (2025). [Πλήρη στοιχεία προς συμπλήρωση].

ecoinvent Association. (n.d.). *Allocation, cut-off by classification: Introduction & key concepts*. Retrieved September 29, 2025, from https://support.ecoinvent.org/

ecoinvent Association. (2024, February 14). *System models*. https://support.ecoinvent.org/system-models

EUMOFA. (2024). *The EU fish market—2024 edition*. European Commission, European Market Observatory for Fisheries and Aquaculture Products.

European Aquaculture Assistance Mechanism. (2024). *Greece: Country information*. European Commission.

European Commission. (n.d.). *Environmental impact assessment*. European Commission.

European Commission. (2019). *The European Green Deal* (COM/2019/640 final). European Commission.

European Commission. (2020). *A Farm to Fork Strategy for a fair, healthy and environmentally-friendly food system* (COM/2020/381 final). European Commission.

European Commission. (2020). *EU Biodiversity Strategy for 2030: Bringing nature back into our lives* (COM/2020/380 final). European Commission.

European Commission. (2021). *Strategic guidelines for a more sustainable and competitive EU aquaculture for the period 2021-2030* (COM/2021/236 final). European Commission.

European Commission. (2026). *Commission staff working document: Evaluation—European Maritime, Fisheries and Aquaculture Fund mid-term evaluation* (SWD(2026) 87 final). European Commission.

European Council. (1992). Council Directive 92/43/EEC on the conservation of natural habitats and of wild fauna and flora. *Official Journal of the European Communities, L 206*, 7-50.

European Maritime, Fisheries and Aquaculture Fund. (2021). *European Maritime, Fisheries and Aquaculture Fund 2021-2027*. European Commission.

European Parliament & Council of the European Union. (2000). Directive 2000/60/EC establishing a framework for Community action in the field of water policy. *Official Journal of the European Communities, L 327*, 1-73.

European Parliament & Council of the European Union. (2008). Directive 2008/56/EC establishing a framework for community action in the field of marine environmental policy. *Official Journal of the European Union, L 164*, 19-40.

European Parliament & Council of the European Union. (2009). Directive 2009/147/EC on the conservation of wild birds. *Official Journal of the European Union, L 20*, 7-25.

European Parliament & Council of the European Union. (2011). Directive 2011/92/EU on the assessment of the effects of certain public and private projects on the environment. *Official Journal of the European Union, L 26*, 1-21.

European Parliament & Council of the European Union. (2013). Regulation (EU) No 1380/2013 on the Common Fisheries Policy. *Official Journal of the European Union, L 354*, 22-61.

European Parliament & Council of the European Union. (2014a). Directive 2014/52/EU amending Directive 2011/92/EU on the assessment of the effects of certain public and private projects on the environment. *Official Journal of the European Union, L 124*, 1-18.

European Parliament & Council of the European Union. (2014b). Directive 2014/89/EU establishing a framework for maritime spatial planning. *Official Journal of the European Union, L 257*, 135-145.

European Union. (2002). Regulation (EC) No 178/2002 of 28 January 2002 laying down the general principles and requirements of food law. *Official Journal of the European Communities, L 31*, 1-24.

European Union. (2004). Regulation (EC) No 852/2004 of 29 April 2004 on the hygiene of foodstuffs. *Official Journal of the European Union, L 139*, 1-54.

European Union. (2012). Consolidated version of the Treaty on the Functioning of the European Union. *Official Journal of the European Union, C 326*, 47-390.

European Union. (2013). Regulation (EU) No 1379/2013 of 11 December 2013 on the common organisation of the markets in fishery and aquaculture products. *Official Journal of the European Union, L 354*, 1-21.

EYDAP. (2024). *Industrial water tariff schedules for Attica region*. Athens Water Supply and Sewerage Company.

FAO & GFCM. (2023). *The state of Mediterranean and Black Sea fisheries 2023*. Food and Agriculture Organization of the United Nations & General Fisheries Commission for the Mediterranean.

Fisheries New Zealand. (2022). *Best practice guidelines for benthic and water quality monitoring of open ocean finfish culture in New Zealand*. Ministry for Primary Industries.

Food and Agriculture Organization. (n.d.). *Introduction to aquaculture*. FAO.

Food and Agriculture Organization. (2010). *Aquaculture development. 4. Ecosystem approach to aquaculture* (FAO Technical Guidelines for Responsible Fisheries No. 5, Suppl. 4). FAO.

Food and Agriculture Organization. (2024). *The State of World Fisheries and Aquaculture 2024: Blue transformation in action*. FAO.

Fuelprices.gr. (2024). *Daily national averages for diesel/gasoline*. Hellenic Ministry of Development & Investments.

Ghamkhar, R., Hicks, A., & Thorne, R. (2021). Life cycle assessment of aquaculture systems: Does burden shifting occur with an increase in production intensity? *Aquacultural Engineering, 92*, 102130.

GLOBALG.A.P. (2025). *Integrated Farm Assurance for aquaculture*. GLOBALG.A.P.

Goedkoop, M. J., & Huijbregts, M. A. J. (2008). *ReCiPe 2008: A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level*.

Goedkoop, M., Oele, M., Vieira, M., Leijting, J., Ponsioen, T., & Meijer, E. (2016). *SimaPro tutorial*. PRé Sustainability.

Greco, S., Ishizaka, A., Tasiou, M., & Torrisi, G. (2019). On the methodological framework of composite indices: A review of the issues of weighting, aggregation, and robustness. *Social Indicators Research, 141*(1), 61-94. https://doi.org/10.1007/s11205-017-1832-9

Guinée, J. B., Heijungs, R., Huppes, G., Zamagni, A., Masoni, P., Buonamici, R., Ekvall, T., & Rydberg, T. (2011a). Life cycle assessment: Past, present, and future. *Environmental Science & Technology, 45*(1), 90-96.

Guinée, J. B., Heijungs, R., Huppes, G., Zamagni, A., Masoni, P., Buonamici, R., Ekvall, T., & Rydberg, T. (2011b). Life cycle sustainability analysis: What is it and what

are its challenges? *Journal of Industrial Ecology, 15*(5), 683-686. https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2011.00398.x

Hala, A. F., Chougule, A., Paes, L. A. B., Ferreira, G. A., & Marques, A. (2024). Life cycle assessment of integrated multi-trophic aquaculture: A review on methodology and challenges for its sustainability evaluation. *Aquaculture, 594*, 741035.

Hargrave, B. T., Phillips, G. A., Doucette, L. I., White, M. J., Milligan, T. G., Wildish, D. J., & Cranston, R. E. (1997). Assessing benthic impacts of organic enrichment from marine aquaculture. *Water, Air, and Soil Pollution, 99*, 641-650.

Henriksson, P. J. G., Guinée, J. B., Kleijn, R., & de Snoo, G. R. (2012). Life cycle assessment of aquaculture systems: A review of methodologies. *The International Journal of Life Cycle Assessment, 17*(3), 304-313. https://doi.org/10.1007/s11367-011-0369-4

Henriksson, P. J. G., et al. (2015). Comparative life cycle assessment of aquaculture systems. *Journal of Cleaner Production, 113*, 43-52.

Holmer, M., Marbà, N., Terrados, J., Duarte, C. M., & Fortes, M. D. (2008). Impacts of milkfish (*Chanos chanos*) aquaculture on carbon and nutrient fluxes in the Bolinao area, Philippines. *Marine Pollution Bulletin, 56*(5), 897-904.

Hoogmartens, R., Van Passel, S., Van Acker, K., & Dubois, M. (2014). Bridging the gap between LCA, LCC and CBA as sustainability assessment tools. *Environmental Impact Assessment Review, 48*, 27-33.

Huijbregts, M. A. J., Steinmann, Z. J. N., Elshout, P. M. F., Stam, G., Verones, F., Vieira, M., Zijp, M., Hollander, A., & van Zelm, R. (2017). ReCiPe 2016: A harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. *The International Journal of Life Cycle Assessment, 22*(2), 138-147. https://doi.org/10.1007/s11367-016-1246-y

Hunkeler, D., Lichtenvort, K., & Rebitzer, G. (Eds.). (2008). *Environmental life cycle costing*. CRC Press/SETAC.

International Organization for Standardization. (2006a). *ISO 14040:2006 Environmental management—Life cycle assessment—Principles and framework*. ISO.

International Organization for Standardization. (2006b). *ISO 14044:2006 Environmental management—Life cycle assessment—Requirements and guidelines*. ISO.

Janssen, R. (2001). On the use of multi-criteria analysis in environmental impact assessment in the Netherlands. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis, 10*(2), 101-109. https://doi.org/10.1002/mcda.293

João, E., & Fonseca, A. (1996). The role of GIS in improving environmental assessment effectiveness: Theory versus practice. *Impact Assessment, 14*(4), 371-387. https://doi.org/10.1080/07349165.1996.9725913

Kallitsis, E., Korre, A., Mousamas, D., & Avramidis, P. (2020). Environmental life cycle assessment of Mediterranean sea bass and sea bream. *Sustainability, 12*(22), 9617. https://doi.org/10.3390/su12229617

Karakassis, I., Tsapakis, M., Hatziyanni, E., Papadopoulou, K. N., & Plaiti, W. (2000). Impact of cage farming of fish on the seabed in three Mediterranean coastal areas. *ICES Journal of Marine Science, 57*(5), 1462-1471.

Lloyd's Register Foundation. (2021). *Occupational health and safety in the aquaculture industry: A global review*. Lloyd's Register Foundation.

Makri, E. (2024). Occupational health and safety in aquaculture: Organisation of work and employment in small seaweed farms in NW Europe. *The Economic and Labour Relations Review*. Advance online publication.

Martinez-Porchas, M., & Martinez-Cordova, L. R. (2012). World aquaculture: Environmental impacts and troubleshooting alternatives. *The Scientific World Journal, 2012*, 389623.

Melaku, S., Mengistou, S., Getahun, A., & Geremew, A. (2024). Environmental impacts of wastes and contaminants from aquaculture and their remediation techniques. In *Freshwater fish—New perspectives*. IntechOpen.

Milián-Sorribes, M. C., Tomás-Vidal, A., Peñaranda, D. S., Carpintero, L., Mesa, J. S., Dupuy, J., Donadeu, A., Macías-Vidal, J., & Martínez-Llorens, S. (2021). Estimation of phosphorus and nitrogen waste in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*, Walbaum,

1792) diets including different inorganic phosphorus sources. *Animals, 11*(6), 1700. https://doi.org/10.3390/ani11061700

Mileti, A., Fabbri, A., & Orsini, F. (2022). Blockchain traceability in trading biomasses obtained from aquaculture. *Sustainability, 15*(1), 767.

National Institute for Public Health and the Environment. (2016). *ReCiPe 2016: A harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. Report I: Characterisation* (RIVM Report 2016-0104). RIVM.

National Institute for Public Health and the Environment. (n.d.). *ReCiPe 2016: Characterisation factors; normalisation scores*. Retrieved September 29, 2025, from the RIVM LCA downloads page.

Naylor, R., Hindar, K., Fleming, I. A., Goldburg, R., Williams, S., Volpe, J., Whoriskey, F., Eagle, J., Kelso, D., & Mangel, M. (2005). Fugitive salmon: Assessing the risks of escaped fish from net-pen aquaculture. *BioScience, 55*(5), 427-437.

Newell, R. I. E. (2004). Ecosystem influences of natural and cultivated populations of suspension-feeding bivalve molluscs: A review. *Journal of Shellfish Research, 23*(1), 51-61.

Papargyris. (2024). *Environmental Impact Assessment: FISHERIES LEROS A.E.* [Environmental impact study].

Pelletier, N., Tyedmers, P., Sonesson, U., Scholz, A., Ziegler, F., Flysjö, A., Kruse, S., Cancino, B., & Silverman, H. (2009). Not all salmon are created equal: Life cycle assessment of global salmon farming systems. *Environmental Science & Technology, 43*(23), 8730-8736. https://doi.org/10.1021/es9010114

Pergent-Martini, C., Boudouresque, C. F., Pasqualini, V., & Pergent, G. (2006). Impact of fish farming facilities on *Posidonia oceanica* meadows: A review. *Marine Ecology, 27*(4), 310-319.

Petrillo, A., De Felice, F., Jannelli, E., Autorino, C., Minutillo, M., & Lavadera, A. L. (2016). Life cycle assessment (LCA) and life cycle cost (LCC) analysis model for a stand-alone hybrid renewable energy system. *Renewable Energy, 95*, 337-355. https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.04.027

Pillay, T. V. R., & Kutty, M. N. (2005). *Aquaculture: Principles and practices* (2nd ed.). Blackwell Publishing.

Pitta, P., Apostolaki, E. T., Tsagaraki, T., Tsapakis, M., & Karakassis, I. (2006). Fish farming effects on chemical and microbial variables of the water column: A spatio-temporal study along the Mediterranean Sea. *Hydrobiologia, 563*, 99-108.

PRé Sustainability. (2022). *SimaPro database manual: Methods library*. PRé Sustainability.

PRé Sustainability. (2023). *SimaPro tutorial*. PRé Sustainability.

PRé Sustainability. (2024). *SimaPro database manual: Methods library*. PRé Sustainability B.V.

PRé Sustainability. (2025, June 2). *ReCiPe*. https://pre-sustainability.com/articles/recipe/

Qi, Z., Zhang, Y., Wang, X., & Zhang, J. (2021). Review of influences of filter-feeding bivalves aquaculture on plankton communities. *South China Fisheries Science, 17*(4), 138-150.

RAE. (2024). *Commercial electricity tariff information and system charges*. Regulatory Authority for Energy.

Reuters. (2025). *Greece submits plans on maritime use after falling foul of EU rules*.

Ross, L. G., Telfer, T. C., Falconer, L., Soto, D., & Aguilar-Manjarrez, J. (2013). *Site selection and carrying capacities for inland and coastal aquaculture* (FAO Fisheries and Aquaculture Proceedings No. 21). FAO.

SEA2SEE. (2023). *Key innovations: Technological innovations & knowledge-based outputs driving sustainable seafood traceability*. Retrieved June 28, 2026, from https://sea2see.eu/key-innovations/

Sala, S., Farioli, F., & Zamagni, A. (2013). Life cycle sustainability assessment in the context of sustainability science progress (Part II). *The International Journal of Life Cycle Assessment, 18*(9), 1686-1697.

Shamsuzzoha, A., Toscano, C., Carneiro, L. M., Kumar, V., & Helo, P. (2024). Blockchain-enabled traceability system for the sustainable seafood industry. *Technology Analysis & Strategic Management, 36*(10), 2148-2164.

SimaPro Support. (n.d.). *Perspectives and weighting approach in ReCiPe method*. Retrieved September 29, 2025.

Society of Environmental Toxicology and Chemistry. (1991). *A technical framework for life-cycle assessment*. SETAC.

STECF - Scientific, Technical and Economic Committee for Fisheries. (2024). *Aquaculture Economic Report* (STECF 24-14 / JRC140767). European Commission.

Tan, K., Zhang, H., Zheng, H., & Li, J. (2024). Effects of bivalve aquaculture on plankton and benthic community: A global meta-analysis. *Science of the Total Environment, 912*, 169395.

Tomassetti, P., Gennaro, P., Lattanzi, L., Mercatali, I., Persia, E., Vani, D., & Porrello, S. (2016). Benthic community response to sediment organic enrichment by Mediterranean fish farms: Case studies. *Aquaculture, 450*, 262-272.

UNEP. (2020). *Guidelines for social life cycle assessment of products and organizations 2020*. United Nations Environment Programme.

UNEP & SETAC. (2009). *Guidelines for social life cycle assessment of products*. United Nations Environment Programme, CIRAIG, FAQDD, and the Belgian Federal Public Planning Service Sustainable Development.

United Nations. (2015). *Transforming our world: The 2030 Agenda for Sustainable Development*. United Nations.

Wang, C. D., Broch, O. J., & Daae, R. L. (2024). Monitoring regional benthic environment of Norwegian salmon cage farms. *Aquaculture Environment Interactions, 16*, 71-87.

Wang, X., Andresen, K., Handå, A., Jensen, B., Reitan, K. I., & Olsen, Y. (2013). Chemical composition and release rate of waste discharge from an Atlantic salmon farm with an evaluation of IMTA feasibility. *Aquaculture Environment Interactions, 4*, 147-162. https://doi.org/10.3354/aei00079

Wang, X., Olsen, L. M., Reitan, K. I., & Olsen, Y. (2013). Discharge of nutrient wastes from salmon farms: Environmental effects, and potential for integrated multi-trophic aquaculture. *Aquaculture Environment Interactions, 2*, 267-283.

Wernet, G., Bauer, C., Steubing, B., Reinhard, J., Moreno-Ruiz, E., & Weidema, B. (2016). The ecoinvent database version 3 (Part I): Overview and methodology. *The International Journal of Life Cycle Assessment, 21*(9), 1218-1230. https://doi.org/10.1007/s11367-016-1087-8

World Commission on Environment and Development. (1987). *Our common future*. Oxford University Press.

Ελαφρού, Ε., & Λουράκη, Χ. (2019). *Μεθοδολογία εκτίμησης περιβαλλοντικών επιπτώσεων*.

Ελληνική Δημοκρατία. (2011). *ΚΥΑ 31722/4-11-2011: Έγκριση Ειδικού Πλαισίου Χωροταξικού Σχεδιασμού και Αειφόρου Ανάπτυξης για τις υδατοκαλλιέργειες και της στρατηγικής μελέτης περιβαλλοντικών επιπτώσεων αυτού* (ΦΕΚ Β΄ 2505/04.11.2011).

Ελληνική Δημοκρατία. (2014). *Νόμος 4282/2014: Ανάπτυξη Υδατοκαλλιεργειών και άλλες διατάξεις* (ΦΕΚ Α΄ 182/29.08.2014).

Ευθυμιάδου, Ζ. (2018). *Εκτίμηση περιβαλλοντικών επιπτώσεων: Εργαλεία και τεχνικές*.

Ευρωπαϊκή Πλατφόρμα Θαλάσσιου Χωροταξικού Σχεδιασμού. (2022). *MSP country information profile: Greece*. European Commission.

Κάλλης, Γ. (2018). *Ανάλυση κύκλου ζωής καινοτόμου συστήματος ηλιακής ψύξης με προσρόφηση*.

Λιόρδος, Β. (2014). *Εκτίμηση περιβαλλοντικών επιπτώσεων: Σημειώσεις μαθήματος*.

Μιχαηλίδου, Α. (2017). *Ανάπτυξη μεθοδολογίας αποτίμησης περιβαλλοντικών επιπτώσεων από παρεμβάσεις με στόχο την τουριστική ανάπτυξη* [Διδακτορική διατριβή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης].

Νόμος 4014/2011. Περιβαλλοντική αδειοδότηση έργων και δραστηριοτήτων, ρύθμιση αυθαιρέτων σε συνάρτηση με δημιουργία περιβαλλοντικού ισοζυγίου και άλλες διατάξεις αρμοδιότητας Υπουργείου Περιβάλλοντος (ΦΕΚ Α΄ 209/21.09.2011).

Νόμος 4964/2022. Διατάξεις για την απλοποίηση της περιβαλλοντικής αδειοδότησης, θέσπιση πλαισίου για την ανάπτυξη των υπεράκτιων αιολικών πάρκων, την αντιμετώπιση της ενεργειακής κρίσης, την προστασία του περιβάλλοντος και λοιπές διατάξεις (ΦΕΚ Α΄ 150/30.07.2022).

Νόμος 5037/2023. Μετονομασία της Ρυθμιστικής Αρχής Ενέργειας σε Ρυθμιστική Αρχή Αποβλήτων, Ενέργειας και Υδάτων και διεύρυνση του αντικειμένου της με αρμοδιότητες επί των υπηρεσιών ύδατος και της διαχείρισης αστικών αποβλήτων, ενίσχυση της υδατικής πολιτικής και λοιπές διατάξεις (ΦΕΚ Α΄ 78/28.03.2023).

Πανεπιστήμιο Αιγαίου. [Διάλεξη]. *Υδατοκαλλιέργειες και θαλάσσιο περιβάλλον: Περιοχές Οργανωμένης Ανάπτυξης Υδατοκαλλιεργειών υπό το πρίσμα της ΟΔΠΖ*. Τμήμα Επιστημών της Θάλασσας, Σχολή Περιβάλλοντος.

Πετρίδη, Α. (2023). *Μελέτη και επίδραση παρεμβάσεων επεξεργασίας αποβλήτων στην αειφορία και τη βιωσιμότητα βιομηχανίας ιχθυοκαλλιεργειών μέσω Αξιολόγησης Κύκλου Ζωής (LCA) και Ανάλυσης Πλέγματος (Nexus)*. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Χημικών Μηχανικών.

Υπουργείο Περιβάλλοντος, Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής. (2011a). *Έγκριση Ειδικού Πλαισίου Χωροταξικού Σχεδιασμού και Αειφόρου Ανάπτυξης για τις υδατοκαλλιέργειες και της στρατηγικής μελέτης περιβαλλοντικών επιπτώσεων αυτού* (ΦΕΚ Β΄ 2505/04.11.2011).

Υπουργείο Περιβάλλοντος, Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής. (2011b). *Στρατηγική Μελέτη Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων του Ειδικού Πλαισίου Χωροταξικού Σχεδιασμού και Αειφόρου Ανάπτυξης για τις Υδατοκαλλιέργειες*. Alpha MENTOR - ΝΕΑΡΧΟΣ.

Χαλεπλή, Ε. (2019). *Εκτίμηση και αξιολόγηση των επιπτώσεων του ενεργειακού τομέα σε εθνικό επίπεδο υπό το πρίσμα NEXUS*.

Ιστοσελίδες:

https://www.un.org/en/academic-impact/sustainability Τελευταία πρόσβαση 14.5.2026

https://www.forin.gr/laws/law/3224/anaptuksh-udatokalliergeiwn-kai-alles diatakseis Τελευταία πρόσβαση 16.5.2026

https://www.reuters.com/world/europe/greece-submits-plans-maritime-use-after-falling-foul-eu-rules-2025-04-16 Τελευταία πρόσβαση 16.5.2026

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8. Παράρτημα

8.1. Λεπτομερής Πίνακες Καταγραφής

Πίνακας 11: Απογραφή για το στάδιο της ιχθυοτροφής

Dataset	Units	In	Out	Ecoinvent Process
GHG CO_2	kg	4.151		Emisions to air Carbon dioxide
Transportation Truck Patra-N. Epidauros	tkm	150		Transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, EURO { GLO} market for, Consq, U
Produced aquafeed	kg/year		1944000	

Πίνακας 12: Απογραφή για το στάδιο της μονάδας ιχθυοκαλλιέργειας

Dataset	Units	In	Out	Ecoinvent Process
Fish aquafeed	kg	1,944,000		
Conversion	KWh	36,608		Electricity, high voltage {GR} electricity production oil, Consequential, U
Vitaquin	kg 0,4%w/w	2		Benzoic Acid {GLO}, market for, Conseq, U
Floating platform	60hp Yamaha FT engine, egine marine type dme-485 47 hp	1		(polypropylene granulate)
Cages (P=40m) (high density granulate GLO	(300kg)	n=7		Polyethylene, High density granulate, {GLO}, Market for, Conseq, U
Cages (P=60m) (polypropylene granulate GLO	(400kg)	N=10		Polyethylene, High density granulate, {GLO}, Market for, Conseq, U

Nets (12m)	Nylon 210/36-(P40) DNET-KHMPE90-(P60) 12 kg	n=17		Polyamide 6.6 fibers (PA 6.66), from adipic acid and hexamethylene diamine (HMDA), prod. Mix, EU-27 S
Fish Farm transportation Naupaktos	km	200		
Waste	kg feces/day		3.090753	
Waste	kg urine/day		0.162671	
Feces 8% Ammonia Urine 1-2% Phosphate				
Ammonia	kg/year		94	Ammonia
Phosphate	kg/year		11.22	Phosphate
Produced fish	kg		540,000	

Πίνακας 13: Απογραφή για το σταδίου του συσκευαστηρίου

Dataset	Units	In	Out	Ecoinvent Process
Produced fish	kg		540,000	
Electricity	KWh	7,937.28		Electricity mix, AC, consumption mix, at consumer, 1kV - 60kV GR S
Electricity	KWh	29,793.92		Electricity mix, AC, consumption mix, at consumer, 1kV - 60kV GR S
Electricity	kWh	4,420		Electricity, medium voltage {GR}, market for, Conseq, U
Petroleum	lt	10.050		
Petrol	lt	21.800		
Water	kg	474,200		Tap Water, at user, {Europe without Switzerland} , market for , Conseq, U

Ice	m^3/day	0.5		
Water for cleaning	kg	34,000		Tap Water, at user, {Europe without Switzerland} , market for , Conseq, U
Conversion	days/year	68		
Foam	kg	56,000		Polystyrene, expandable {GLO}, market for, Conseq, U
Sealing tapes	kg	227		Polypropylene, granulate {GLO}, market for, Conseq, U
Wrapping film	kg	281.5		Packaging film low density polyethylene {GLO}, market for, Conseq, U
Paper sheets	units	66,522		Paper, woodfree coated, {RER}, market for, Conseq, U
Labels	units	66,522		Printed paper {GLO}, market for, Conseq, U
Electricity for temperature regulation	kW	35.81		Electricity medium voltage
Conversion	Hr/y	832		
Liquid waste	kg		112,200	Waste Water-untreated, organic contaminated EU-27S
Packaged products	kg		540,000	

Πίνακας 14: Απογραφή για το στάδιο της διανομής

Dataset	Units	In	Out	Ecoinvent Process
Transportaion truck	kgkm	65,280,000		Transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, EURO { GLO} market for, Consq, U
Diesel	Lt	42		
Operation	d/y	68		

Electricity	Kwh/m^3/y	40		Country mix, medium voltage, electricity, AC, consumprion mix, at consumer, {GR}
Waste plastic packaging units	kg		3480	Waste paper unsorted
Waste paper packaging units	kg		1960	Waste packaging paper

Πίνακας 15: Απογραφή για το στάδιο της μεταφοράς

Dataset	Units	In	Out	Ecoinvent Process
For Transport	kg	540,000		
Transportation truck inland	tkm	316,800		Transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, EURO { GLO} market for, Consq, U
Transportation truck Germany	tkm	50,905.96		Transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, EURO { GLO} market for, Consq, U
Transportation truck Spain	tkm	32,468.4		Transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, EURO { GLO} market for, Consq, U
Transportation truck France	tkm	153,588.156		Transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, EURO { GLO} market for, Consq, U
Transportation truck Italy	tkm	27,489.27		Transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, EURO { GLO} market for, Consq, U
Transportation truck Netherlands	tkm	191,775.456		Transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, EURO {

				GLO} market for, Consq, U
Transportation truck Cyprus		22,858.686		Transport, freight, aircraft, { GLO} market for, Consq, U
Transportation truck Israel		262,715.2		Transport, freight, aircraft, { GLO} market for, Consq, U
ADBLUE	kg	30.27		Urea, as N {RER}, production, Conseq, U

Πίνακας 16: Απογραφή για το στάδιο της εμπορίας

Dataset	Units	In	Out	Ecoinvent Process
Retail Domestic	Kg	432,000		
Reail Export	kg	108,000		
Electricity Retail Greece	KWh/kg	0.4		Electricity, low voltage, {GR}, market for, Conse, U
Electricity Retail Abroad	KWh/kg	0.3		Electricity, low voltage {RoW}, market for, Conseq, U

Συλλογή Δεδομένων και Πηγές

Πίνακας 8.1*: Συλλογή δεδομένων για τη μεθοδολογία LCA*

SYSTEM PHASE	DATA	VALUE	SOURCE
Fish Feed			
Input	GHG kg CO2/kg Feed	1.04	Sea2See Consortium. (2023)
	Transportation	150km-Truck Patra-N. Epidauros	Sea2See Consortium. (2023)
Output	Produced aquafeed	1944000 kg/year	Sea2See Consortium. (2023)
Fish Farm			Sea2See Consortium. (2023)
Input	Fish Growing Cycle	17 months	Sea2See Consortium. (2023)

	Feed Conversion Rate (FCR)	1.8kg feed/1kg fish	Sea2See Consortium. (2023)
	PETROGEN type 22E with PERKINS engine 404-22G MECCALTE/LEROY SOMER/MARELLI generator	22KVA	Sea2See Consortium. (2023)
	Vitaquin	2kg 0,4%w/w	Sea2See Consortium. (2023)
	Floating platform (polypropylene granulate)	60hp Yamaha FT engine, marine type dme-485 47 hp	Sea2See Consortium. (2023)
	Cages (P=40m) (high density granulate GLO	n=7 (300kg)	Sea2See Consortium. (2023)
	Cages (P=60m) (polypropylene granulate GLO	N=10 (400kg)	Sea2See Consortium. (2023)
	Nets (12m)	n=17 Nylon 210/36-(P40) DNET-KHMPE90-(P60)	Sea2See Consortium. (2023)
	Fish Farm transportation Naupaktos	200km	Sea2See Consortium. (2023)
Output	Waste	3.090753 kg feces/day	Papargyris, 2024; Milián-Sorribes et al., 2021; Wang et al., 2013
		0.162671 kg urine/day	Papargyris, 2024; Milián-Sorribes et al., 2021; Wang et al., 2013
	Feces 8% Ammonia Urine 1-2% Phosphate	Ammonia=0.253kg/day Phosphate=0.031kg/day	Milián-Sorribes et al., 2021; Wang et al., 2013
<u>Packaging Facility</u>			
Input	Electricity for packaging system	9.54KW	Sea2See Consortium. (2023)
	Fuel consumption	10.050lt Petroleum/ 21.800lt Petrol	Sea2See Consortium. (2023)
	Water consumption for washing	1.15 m^3 of water/ day	Sea2See Consortium. (2023)
	Ice making	0.5 m^3/day	Sea2See Consortium. (2023)
	Cleaning of facilities and equipment	2.15 m^3/ day	Sea2See Consortium. (2023)
	Operation	68 days/year	Sea2See Consortium. (2023)
	Foam polystyrene	66522 units	Sea2See Consortium. (2023)
	Sealing tapes	227 units	Sea2See Consortium. (2023)
	Wrapping film	281.5 units	Sea2See Consortium. (2023)
	Paper sheets	66522 units	Sea2See Consortium. (2023)
	Labels	66522 units	Sea2See Consortium. (2023)
	Electricity for temperature regulation	35.81kW	Sea2See Consortium. (2023)
	Ice	200 ton	Sea2See Consortium. (2023)

Outputs	Liquid waste	1.65 m³/ day	Sea2See Consortium. (2023)
	Packaged products	540 ton	Sea2See Consortium. (2023)
Distribution			
Inputs	N. Epidauros -Aspropyrgos	Truck with 8 tn cargo 120km 42 lt (35lt/100Km)	Sea2See Consortium. (2023)
	Aspropyrgos -N. Epidauros	Truck 120km 30 lt (25lt/100km)	Sea2See Consortium. (2023)
	Operation	68 days/year	Sea2See Consortium. (2023)
	Electricity for refrigeration	40KWh/ m³/year	Sea2See Consortium. (2023)
	Enterprise Volume	225 m³	Sea2See Consortium. (2023)
Outputs	Waste plastic packaging units	6760	Sea2See Consortium. (2023)
	Waste paper packaging units	6960	Sea2See Consortium. (2023)
Transport			
Inputs	Truck with cargo Inland	3300Km (550km*6 times /month) Diesel	Own elaboration
	Truck with cargo Abroad	Germany = 22645 kg	Own elaboration
		Spain =9330 kg	Own elaboration
		France = 58332 kg	Own elaboration
		Italy =22349 kg	Own elaboration
		Netherlands = 74016 kg	Own elaboration
	Air Freight with cargo Abroad	Cyprus = 25569kg	Own elaboration
		Israel =199714	Own elaboration
	ADBLUE (with cargo)	1.44 lt/per 120 Km (20 lt per 500lt of diesel)	Sea2See Consortium. (2023)
Outputs	No data		
Trade			
Inputs	Retail Greece	80%of 540ton sea beam	Sea2See Consortium. (2023)
	Export Abroad	20% of 540 ton sea beam	Sea2See Consortium. (2023)
	Electricity consumption for food preservation Greece	0.40 kWh/kg	Pelletier & Tyedmers, 2009; Henriksson et al., 2015; UNEP & SETAC, 2009
	Electricity consumption for food preservation Abroad	0.30 kWh/kg	Pelletier & Tyedmers, 2009; Henriksson et al., 2015; UNEP & SETAC, 2009
Output	No data		

Πίνακας 8.2*: Απογραφή για το στάδιο της ιχθυοτροφής*

Dataset	Units	In	Out	Ecoinvent Process
GHG CO_2	Kg	4.151		Emisions to air Carbon dioxide

Transportation Truck Patra-N. Epidauros	Tkm	150		Transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, EURO { GLO} market for, Consq, U
Produced aquafeed	kg/year		1,944,000	

Πίνακας 8.3*: Απογραφή για το στάδιο της μονάδας ιχθυοκαλλιέργειας*

Dataset	**Units**	**In**	**Out**	**Ecoinvent Process**
Fish aquafeed	kg	1,944,000		
Conversion	KWh	36,608		Electricity, high voltage {GR} electricity production oil, Consequential, U
Vitaquin	kg 0,4%w/w	2		Benzoic Acid {GLO}, market for, Conseq, U
Floating platform	60hp Yamaha FT engine, egine marine type dme-485 47 hp	1		(polypropylene granulate)
Cages (P=40m) (high density granulate GLO	(300kg)	n=7		Polyethylene, High density granulate, {GLO}, Market for, Conseq, U
Cages (P=60m) (polypropylene granulate GLO	(400kg)	N=10		Polyethylene, High density granulate, {GLO}, Market for, Conseq, U
Nets (12m)	Nylon 210/36-(P40) DNET-KHMPE90-(P60) 12 kg	n=17		Polyamide 6.6 fibers (PA 6.66), from adipic acid and hexamethylene diamine (HMDA), prod. Mix, EU-27 S
Fish Farm transportation Naupaktos	km	200		
Waste Feces 8% Ammonia	kg feces/day		3.090753	
Waste Urine 1-2% Phosphate	kg urine/day		0.162671	
Ammonia	kg/year		94	Ammonia
Phosphate	kg/year		11.22	Phosphate
Produced fish	kg		540,000	

Πίνακας 8.4*: Απογραφή για το σταδίου του συσκευαστηρίου*

	Units	**In**	**Out**	**Ecoinvent Process**
Produced fish	kg		540000	
Electricity	KWh	7,937.28		Electricity mix, AC, consumption mix, at consumer, 1kV -60kV GR S
Electricity	KWh	29,793.92		Electricity mix, AC, consumption mix, at

				consumer, 1kV -60kV GR S
Electricity	kWh	4,420		Electricity, medium voltage {GR}, market for, Conseq, U
Petroleum	lt	10.050		
Petrol	lt	21.800		
Water	kg	474,200		Tap Water, at user, {Europe without Switzerland} , market for , Conseq, U
Ice	m^3/day	0.5		
Water for cleaning	kg	34,000		Tap Water, at user, {Europe without Switzerland} , market for , Conseq, U
Conversion	days/year	68		
Foam	kg	56,000		Polystyrene, expandable {GLO}, market for, Conseq, U
Sealing tapes	kg	227		Polypropylene, granulate {GLO}, market for, Conseq, U
Wrapping film	kg	281.5		Packaging film low density polyethylene {GLO}, market for, Conseq, U
Paper sheets	units	66,522		Paper, woodfree coated, {RER}, market for, Conseq, U
Labels	units	66,522		Printed paper {GLO}, market for, Conseq, U
Electricity for temperature regulation	kW	35.81		Electricity medium voltage
Conversion	Hr/y	832		
Liquid waste	kg		112,200	Waste Water- untreated, organic contaminated EU-27S
Packaged products	kg		540,000	

Πίνακας 8.5*: Απογραφή για το στάδιο της διανομής*

Dataset	**Units**	**In**	**Out**	**Ecoinvent Process**
Transportaion truck	kgkm	65280000		Transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, EURO { GLO} market for, Consq, U
Diesel	Lt	42		
Operation	d/y	68		
Electricity	Kwh/m^3/y	40		Country mix, medium voltage, electricity, AC, consumprion mix, at consumer, {GR}

Waste plastic packaging units	kg		3,480	Waste paper unsorted
Waste paper packaging units	kg		1,960	Waste packaging paper

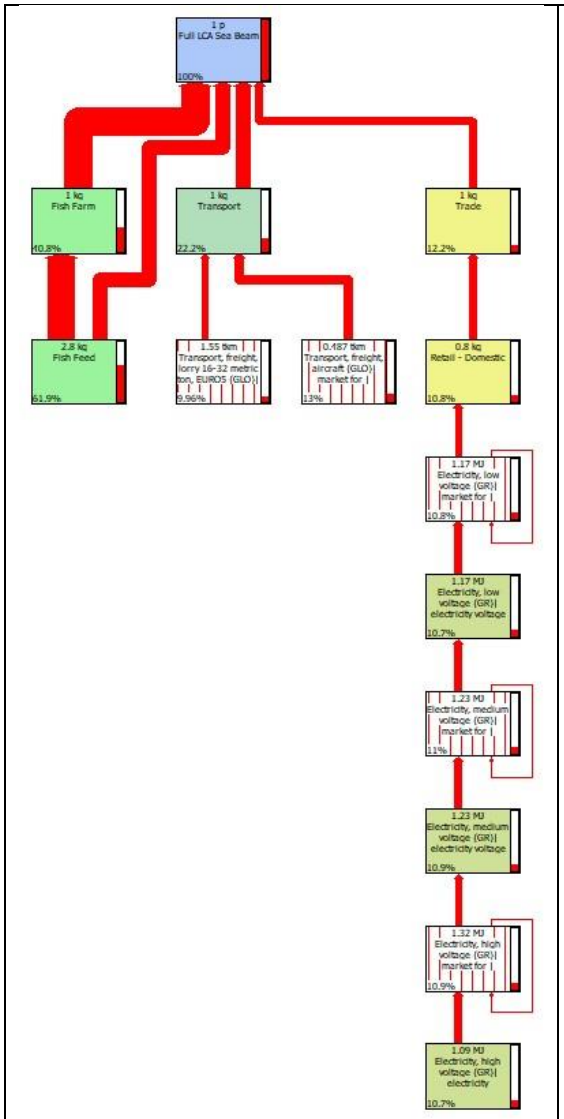
Πίνακας 8.6*: Απογραφή για το στάδιο της μεταφοράς*

Dataset	**Units**	**In**	**Out**	**Ecoinvent Process**
For Transport	kg	540,000		
Transportation truck inland	tkm	31,6800		Transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, EURO { GLO} market for, Consq, U
Transportation truck Germany	tkm	50,905.96		Transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, EURO { GLO} market for, Consq, U
Transportation truck Spain	tkm	32,468.4		Transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, EURO { GLO} market for, Consq, U
Transportation truck France	tkm	153,588.156		Transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, EURO { GLO} market for, Consq, U
Transportation truck Italy	tkm	27,489.27		Transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, EURO { GLO} market for, Consq, U
Transportation truck Netherlands	tkm	191,775.456		Transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, EURO { GLO} market for, Consq, U
Transportation truck Cyprus		22,858.686		Transport, freight, aircraft, { GLO} market for, Consq, U
Transportation truck Israel		262,715.2		Transport, freight, aircraft, { GLO} market for, Consq, U
ADBLUE	kg	30.27		Urea, as N {RER}, production, Conseq, U

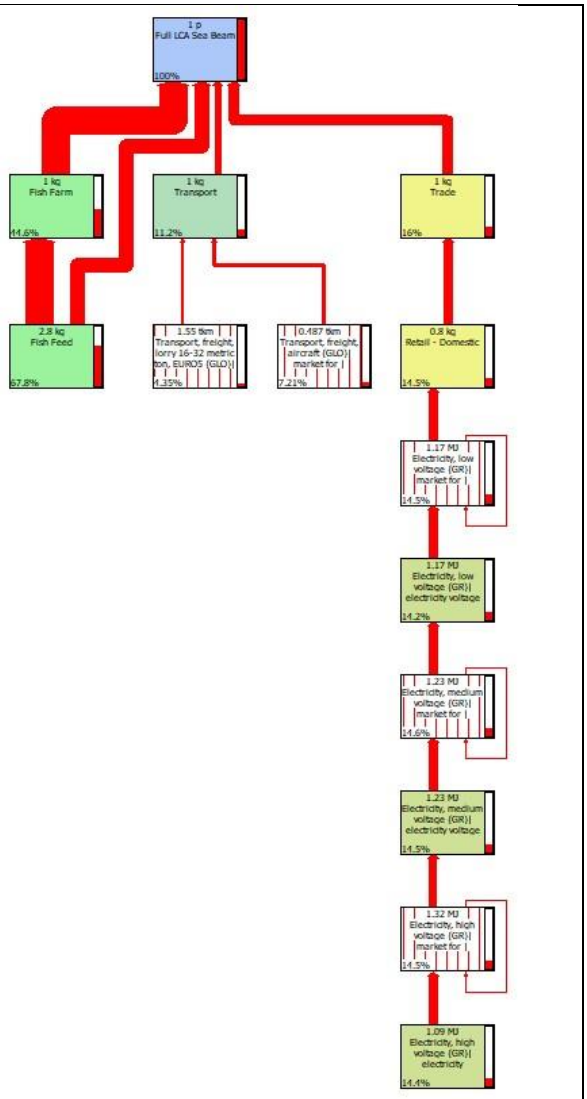
Πίνακας 8.7*: Απογραφή για το στάδιο της εμπορίας*

Dataset	**Units**	**In**	**Out**	**Ecoinvent Process**
Retail Domestic	Kg	432,000		
Reail Export	kg	108,000		
Electricity Retail Greece	KWh/kg	0.4		Electricity, low voltage, {GR}, market for, Conse, U
Electricity Retail Abroad	KWh/kg	0.3		Electricity, low voltage {RoW}, market for, Conseq, U

8.2. Συμπληρωματικά Αποτελέσματα Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων



Εικόνα 1α: ecosystem damage assessment



Εικόνα 1β: Human Health damage assessment

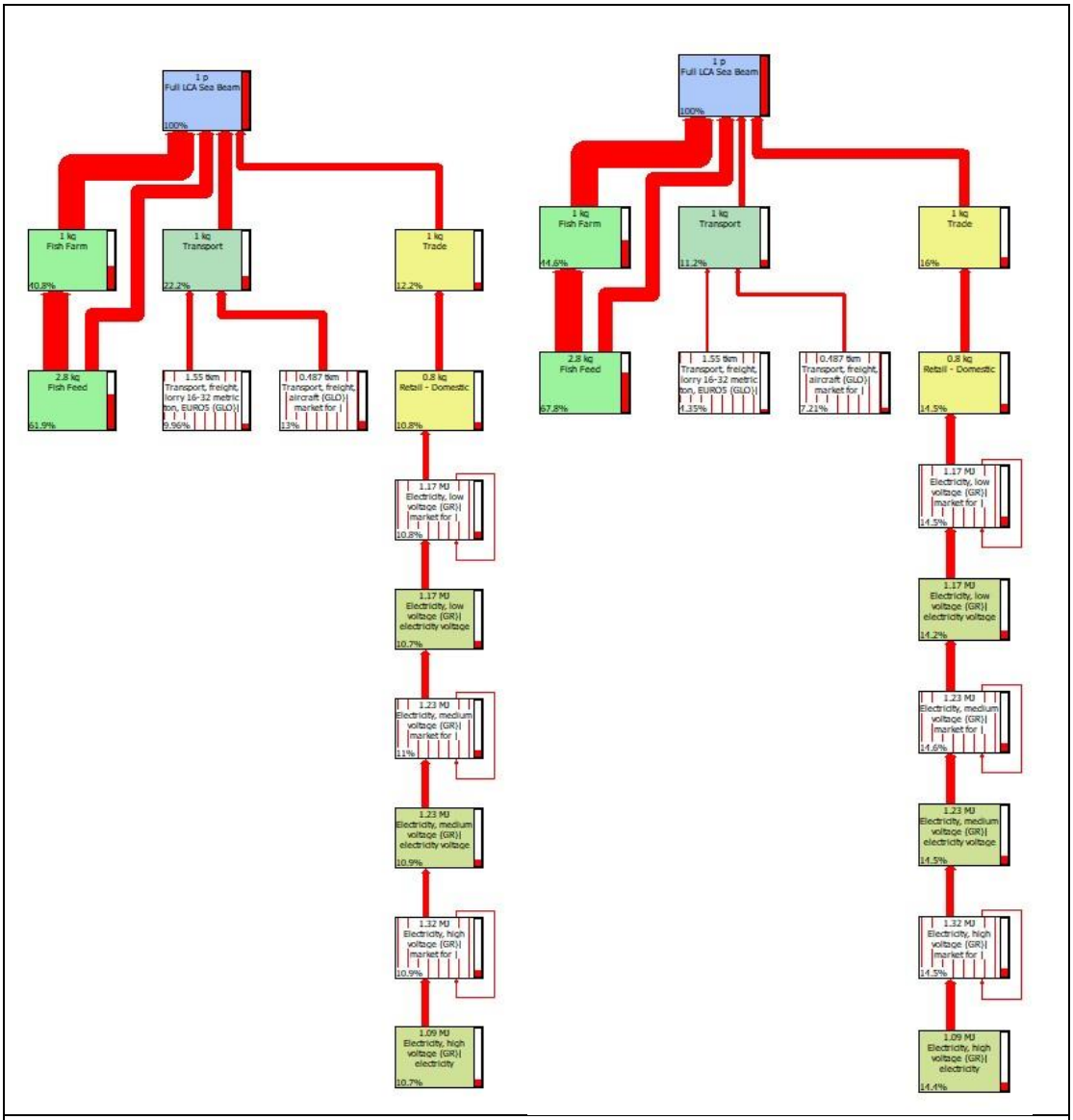
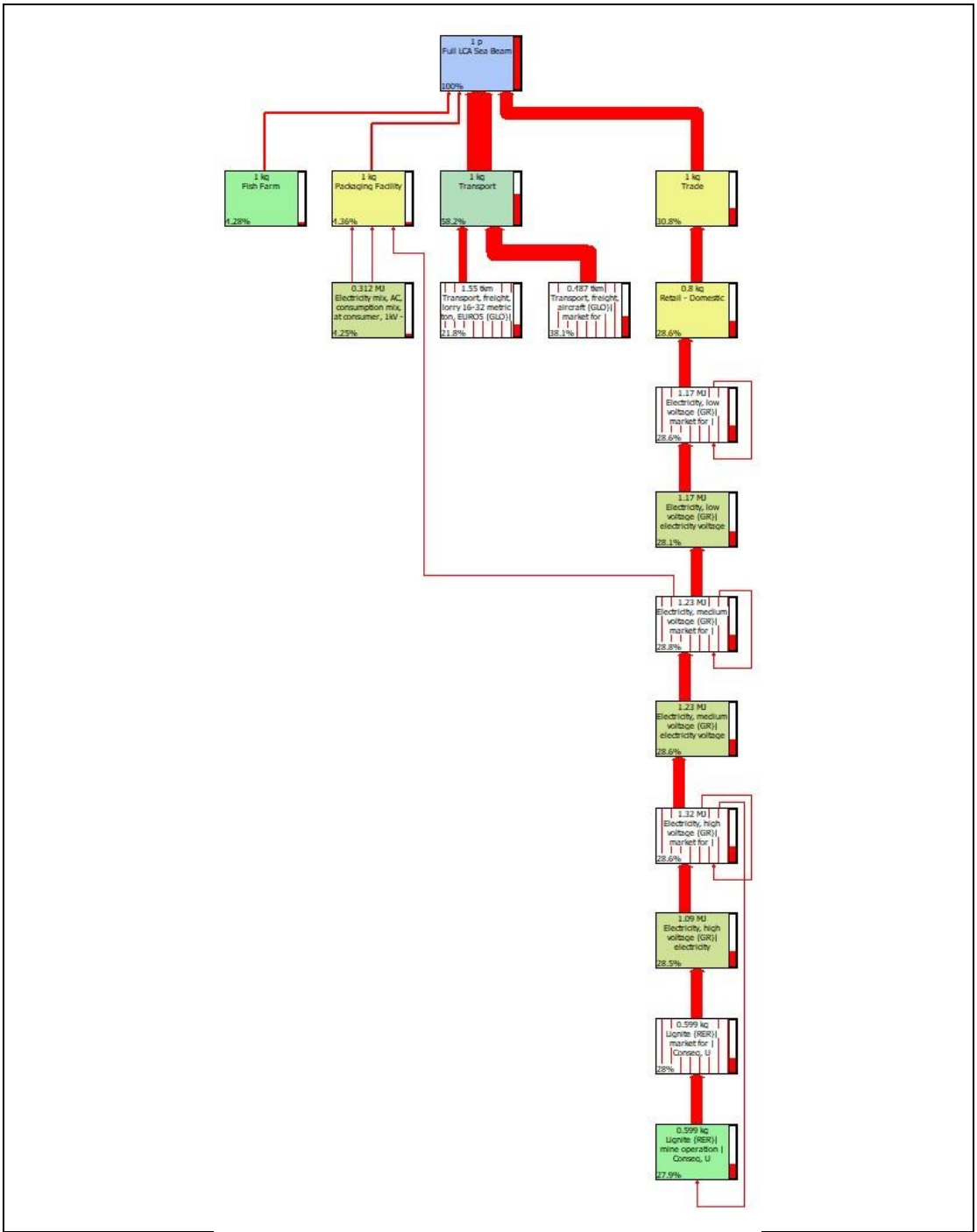
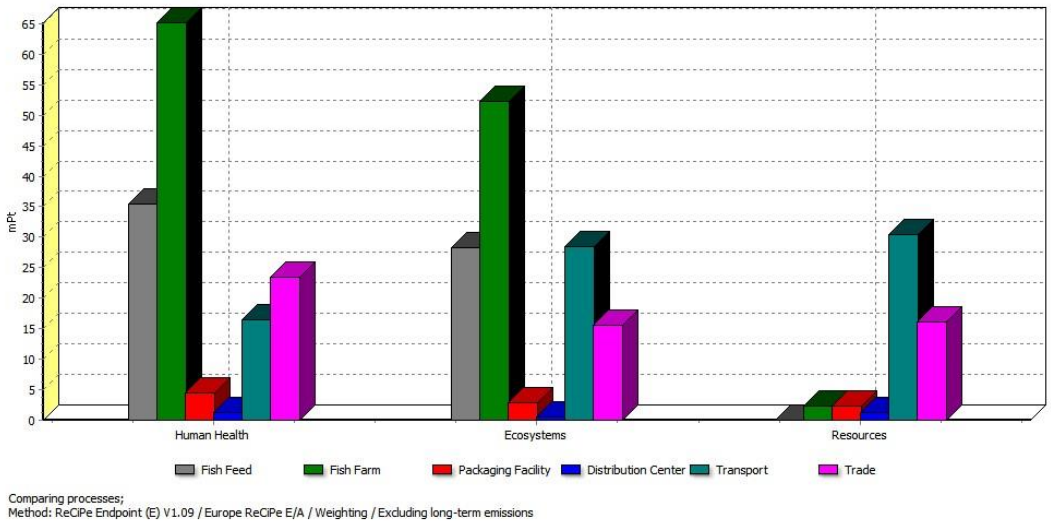


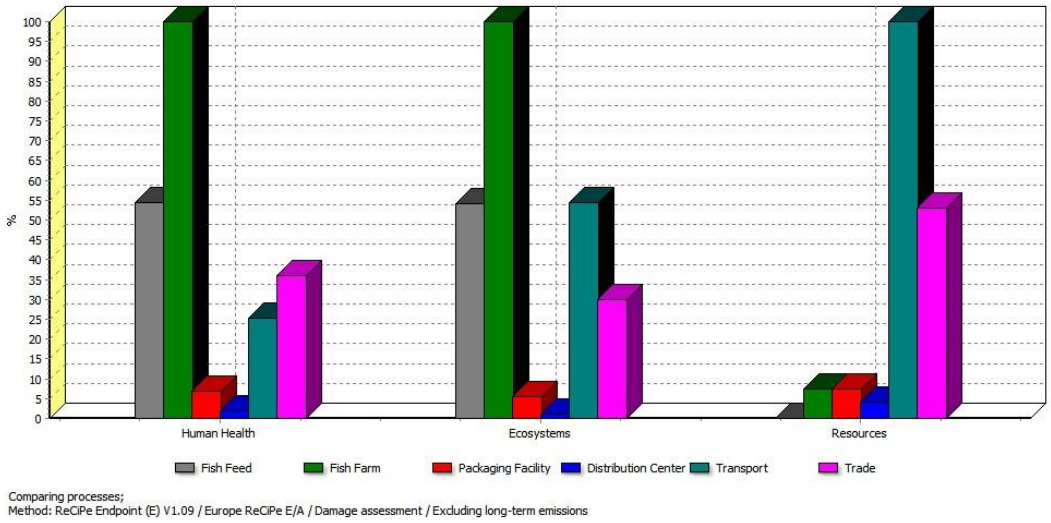
Figure 2c: Flowchart endpoint resources **Figure 2d:** Flowchartendpoint single score



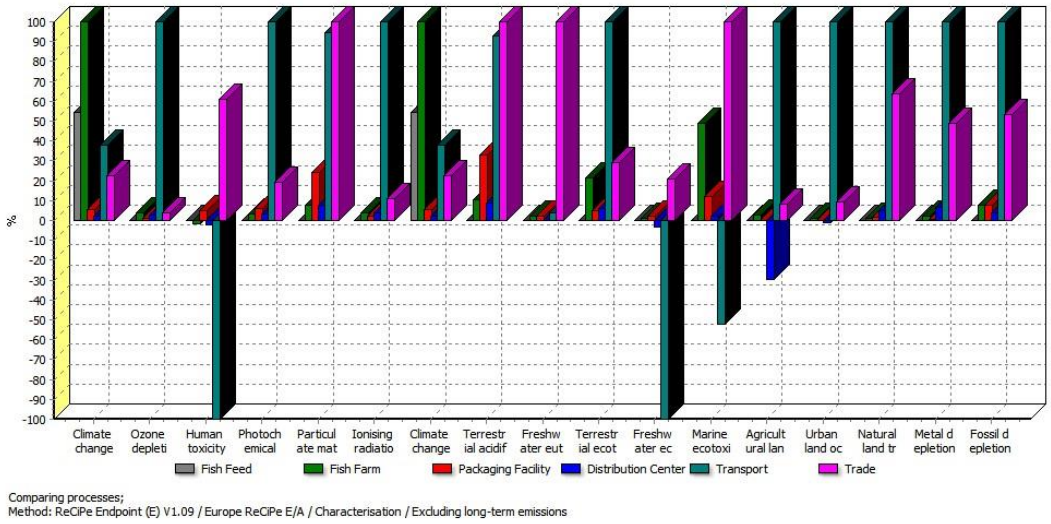
Εικόνα 2c : Resource damage assessment



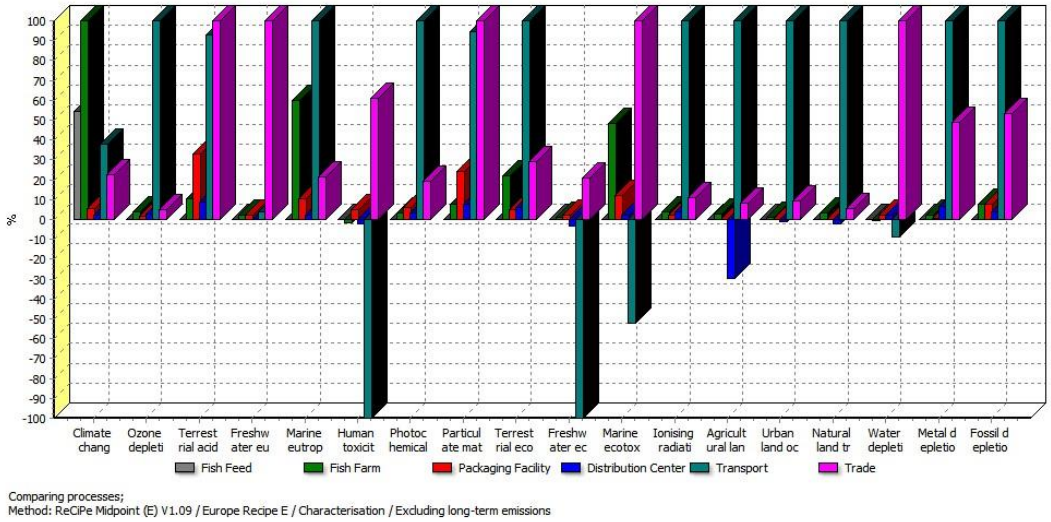
Εικονα 8.1: Recipe Egalitarian Endpoint results Weighting



Εικόνα 8.2: Recipe Egalitarian Endpoint results Damage Assessment



Εικόνα 8.3: Recipe Egalitarian Midpoint results Characterization



Εικόνα 8.4: Recipe Egalitarian Endpoint results Characterization

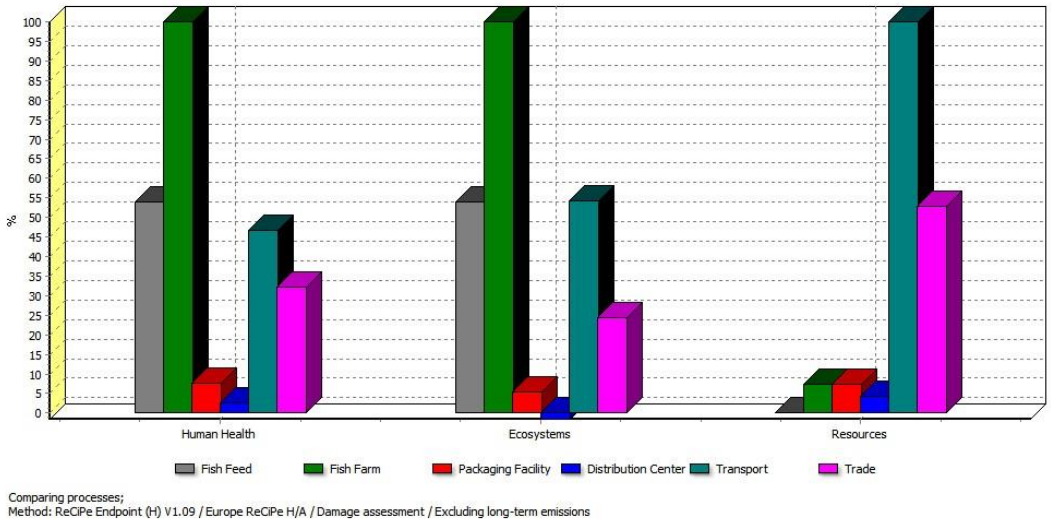


Figure 8.5: Recipe Hierarchrist Endpoint results Damage Assessment

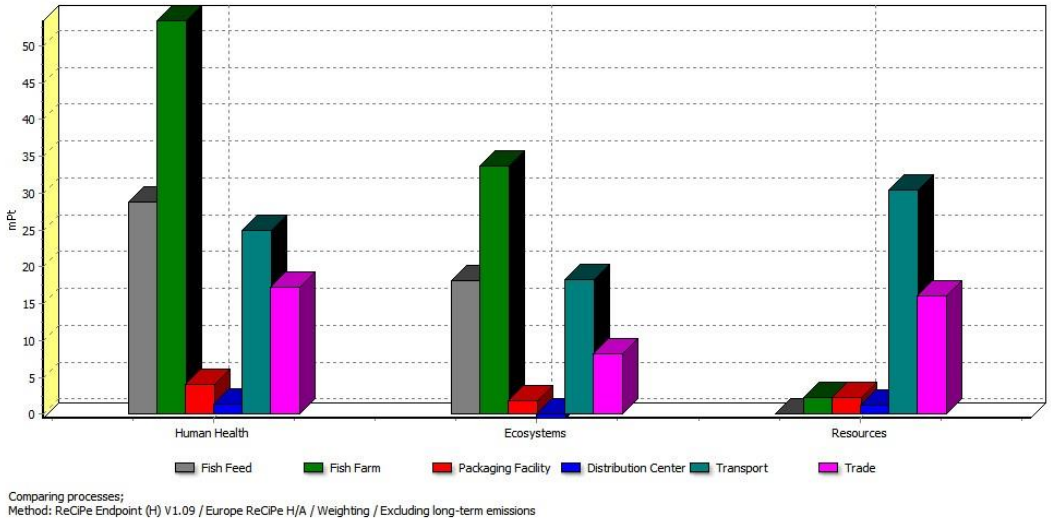
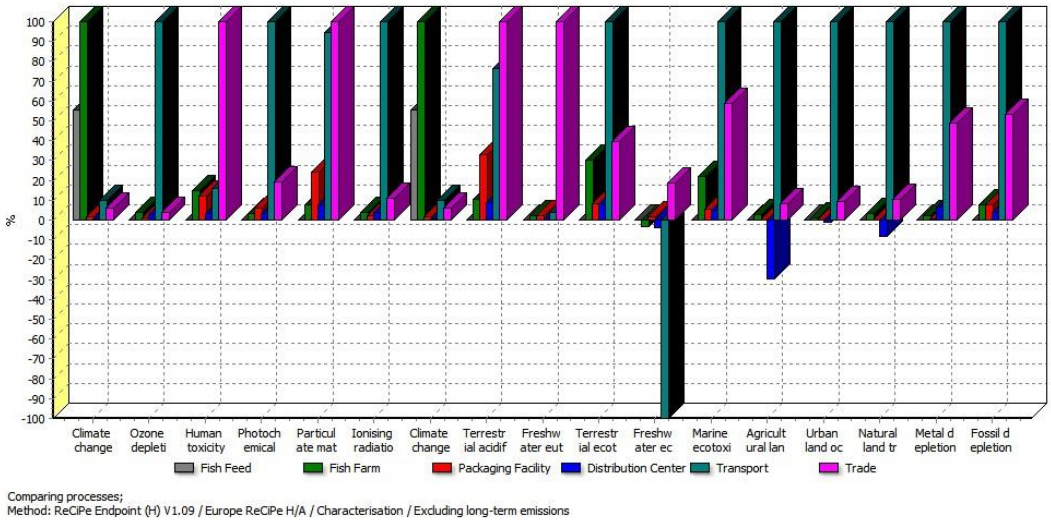
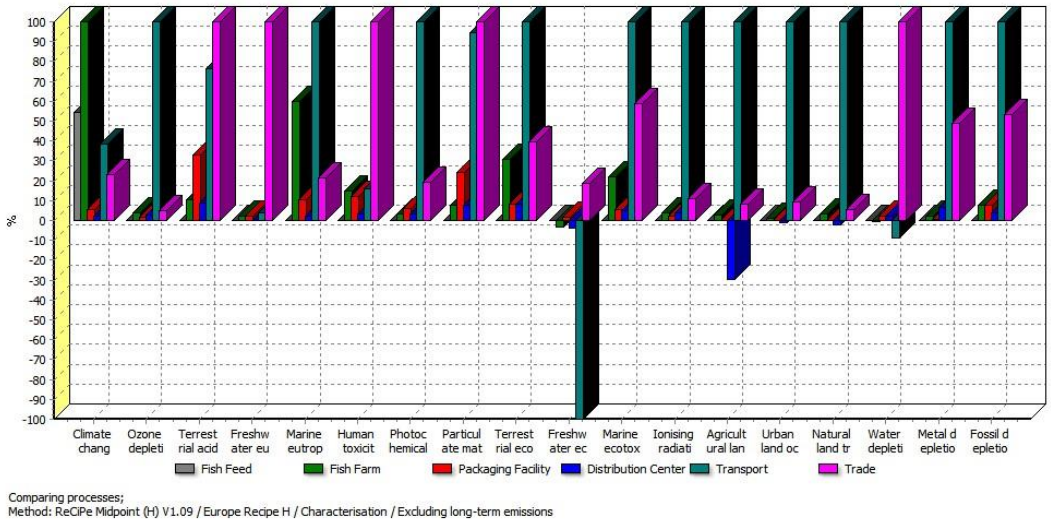


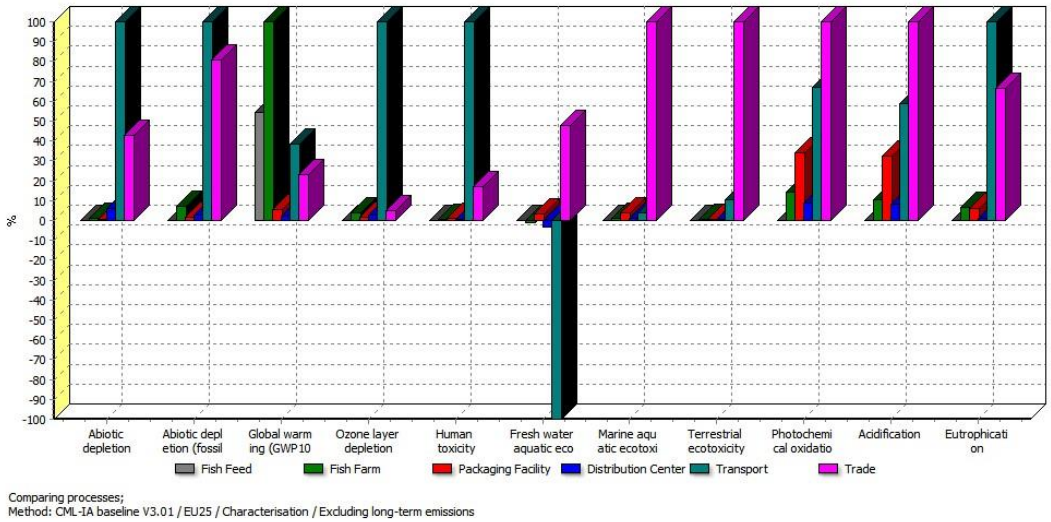
Figure 8.6: Recipe Hierarchrist Endpoint results Weighting



Εικόνα 8.7: Recipe Hierarchrist Endpoint results Characterization



Εικόνα 8.8: Recipe Hierarchrist Midpoint results Characterization



Εικόνα 8.9: CLM-IA results Characterization