



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΩΝ ΚΑΙ
ΒΙΩΣΙΜΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΜΕΛΕΤΗ ΒΙΩΣΙΜΟΤΗΤΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΒΙΟΝΤΙΖΕΛ ΜΕ ΤΗΝ ΜΕΘΟΔΟ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΚΥΚΛΟΥ ΖΩΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΤΟΥ ΑΝΤΩΝΙΑΔΗ ΓΑΒΡΙΗΛ ΑΝΤΩΝΗ

ΧΑΝΙΑ, 2016

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

Καθηγητής ΘΕΟΧΑΡΗΣ ΤΣΟΥΤΣΟΣ (ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ)

Καθηγητής ΚΑΛΟΓΕΡΑΚΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ

Αναπλ. Καθηγητής ΓΚΙΚΑΣ ΠΕΤΡΟΣ



" Copyright © Αντωνιάδης Γαβριήλ Αντώνης, 2016
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για μη κερδοσκοπικό σκοπό, εκπαιδευτικού ή ερευνητικού χαρακτήρα, με την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης.

Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για άλλη χρήση θα πρέπει να απευθύνονται προς το συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Πολυτεχνείου Κρήτης".

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία με τίτλο «Μελέτη βιωσιμότητας συστήματος παραγωγής βιοντίζελ με την μέθοδο ανάλυσης κύκλου ζωής », πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της προπτυχιακής εκπαίδευσης μου στο Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος.

Αρχικά, επιθυμώ να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στον Καθηγητή της σχολής Μηχανικών Περιβάλλοντος και επιβλέποντα της παρούσας διπλωματικής εργασίας κ. Θεοχάρη Τσούτσο, για την ευκαιρία που μου έδωσε, να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον και συνάμα σημαντικό περιβαλλοντικά θέμα, καθώς και για τις πολύτιμες γνώσεις του που με καθοδηγούσαν καθόλα τη διάρκεια εκπόνησης αυτής της εργασίας.

Επιπρόσθετα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τη Δρ. Αριάδνη Παντίδου καθώς και τον Δρ. Σπυρίδωνα Φωτείνη, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή τους.

Επιπλέον, οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ και στα μέλη της εξεταστικής επιτροπής κ. Γκίκα Πέτρο και κ. Καλογεράκη Νικόλαο, Καθηγητές της Σχολής Μηχανικών Περιβάλλοντος, για την τιμή που μου έκαναν να αποτελέσουν μέλη της εξεταστικής μου επιτροπής.

Τέλος, στις ευχαριστίες δεν θα μπορούσα να μην συμπεριλάβω την οικογένεια μου, καθώς και τους κοντινούς μου ανθρώπους που στηρίζουν την κάθε μου επιλογή.

Περίληψη

Σκοπός της συγκεκριμένης εργασίας είναι μελέτη της βιωσιμότητας ενός συστήματος παραγωγής βιοντίζελ από μικροφύκη με τη μέθοδο ανάλυσης κύκλου ζωής. Συγκεκριμένα μελετήθηκαν τέσσερις διαφορετικές καλλιέργειες μικροφυκών ως προς την διαδικασία παραγωγής τους και στην συνέχεια έγινε σύγκριση των περιβαλλοντικών επιπτώσεών τους μεταξύ τους, αλλά και σε σχέση με το συμβατικό ντίζελ. Οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν λήφθηκαν υπόψη βάση των ελληνικών στοιχείων.

Είναι γεγονός ότι στις μέρες η κλιματική αλλαγή έχει θέσει ως αναγκαία προϋπόθεση την χρήση βιοκαυσίμων έναντι των κοινών καυσίμων. Στη βάση αυτή έχει αναπτυχθεί μεγάλη έρευνα σε παγκόσμιο επίπεδο γύρω από τον τομέα των μικροφυκών, καθώς αποτελούν μία πολλά υποσχόμενη πηγή βιοκαυσίμων λόγω συγκεκριμένων χαρακτηριστικών τους. Παρόλα αυτά η έρευνα αυτή βρίσκεται ακόμα σε πρώιμο στάδιο λόγω της ποικιλότητας των ειδών αλλά και των μεθόδων παραγωγής τους.

Τα περιβαλλοντικά φορτία που προκύπτουν ανά κιλό παραγόμενου βιοντίζελ δείχνουν ότι η καλλιέργεια με την μικρότερη επιβάρυνση στο περιβάλλον είναι αυτή του είδους *Spirulina Platensis* σε ανοιχτή δεξαμενή. Ωστόσο συγκριτικά με το κοινό ντίζελ τα αποτελέσματα μοιάζουν αποθαρρυντικά. Μόνο με την χρήση των εναλλακτικών σεναρίων προκύπτουν μικρότερες περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις για ορισμένες από τις εξεταζόμενες καλλιέργειες σε σχέση με το ντίζελ.

Τα αποτελέσματα μας οδηγούν στο συμπέρασμα ότι μόνο με την εξέλιξη των τεχνολογιών παραγωγής και την διερεύνηση εναλλακτικών μεθόδων επεξεργασίας με μικρότερες ενεργειακές απαιτήσεις μπορεί να καταστεί εφικτή η βιωσιμότητα παρόμοιων διαδικασιών παραγωγής βιοντίζελ, καθώς με τις παρούσες συνθήκες το προερχόμενο από μικροφύκη βιοντίζελ φαντάζει περιβαλλοντικά ασύμφορο.

Abstract

The purpose of the thesis is to study the environmental viability of a biodiesel production system from microalgae applying the life cycle analysis method. Specifically we have studied four different cultures of microalgae and in their production processes, and then we have compared the environmental impact of each one, and also with respect to the standard diesel. The parameters used were considered the basis of the Greek data.

Nowadays the climate change defines as a prerequisite the use of biofuels against common fuels. On this basis has thrived much research worldwide around the microalgae sector, because they are a promising source of biofuels due to their specific characteristics. Nevertheless, this research is still at an early stage because of the diversity of species and their production methods.

Environmental loads arising per kg of biodiesel produced show that the culture with fewer burdens on the environment is the one of the specie *Spirulina Platensis*, in an open pond. Yet compared with standard common diesel results seem discouraging. Only with the use of alternative scenarios resulting reduced environmental loads for some of the tested crops in relation to diesel.

Our results suggest that only the development of production technologies and the development of alternative treatment methods with lower energy requirements can enable the viability of such biodiesel production processes, because under the current circumstances the derived from microalgae biodiesel seems environmentally unattractive.

Πίνακας περιεχομένων

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	10
1.1 Βιοκαύσιμα.....	10
1.1.1 Τι είναι τα Βιοκαύσιμα	10
1.1.2 Είδη Βιοκαυσίμων	11
1.1.3 Γενιές Βιοκαυσίμων	12
1.2 Βιοντίζελ	13
1.2.1 Πως παράγεται το βιοντίζελ	14
1.2.2 Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα	15
1.3 Άλγη.....	16
1.3.1 Ανοιχτά συστήματα καλλιέργειας (Open ponds).....	17
1.3.2 Κλειστά συστήματα καλλιέργειας (Close ponds)	19
1.3.3 Θερμοκρασία	23
1.4 Ελληνική και διεθνής πραγματικότητα.....	24
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΥΚΛΟΥ ΖΩΗΣ.....	25
2.1 Τι είναι η ανάλυση κύκλου ζωής.....	25
2.1.1 Στάδια ανάλυσης κύκλου ζωής.....	26
2.2 Εργαλεία Ανάλυσης Κύκλου Ζωής	28
2.3 SimaPro 7	29
2.4 Ορισμός Κύκλου Ζωής	31
2.4.1 Καλλιέργεια Άλγης	32
2.4.2 Συγκομιδή και Ξήρανση Άλγης.....	34
2.4.3 Εκχύλιση Ξηρής Βιομάζας Άλγης μέσω Soxhlet	36
2.4.4 Μετατροπή Ελαίου Άλγης σε Βιοντίζελ	38
2.5 Διεθνής Επιστημονική Εμπειρία.....	39
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΤΑΔΙΩΝ ΚΥΚΛΟΥ ΖΩΗΣ	41
3.1 Σκοπός	41
3.2 Ανάλυση Κύκλου Ζωής Καλλιέργειας του Είδους <i>Spirulina Platensis</i> σε Ανοιχτή Δεξαμενή.....	43
3.2.1 Στάδιο Καλλιέργειας	43
3.2.2 Στάδιο Συγκομιδής και Ξήρανσης	47
3.2.3 Στάδιο Εκχύλισης της Ξηρής Βιομάζας.....	48

3.2.4 Στάδιο Μετατροπής Ελαίου Άλγης σε Βιοντίζελ	50
3.2.3 Επιπλέον καταναλώσεις κατά την διάρκεια λειτουργίας.....	51
3.2 Ανάλυση Κύκλου Ζωής Καλλιέργειας του Είδους <i>Nannochloropsis</i> Sp. σε Ανοιχτή Δεξαμενή.....	53
3.3 Ανάλυση Κύκλου Ζωής Καλλιέργειας του Είδους <i>Spirulina</i> <i>Platensis</i> σε Κλειστή Δεξαμενή.....	57
3.4 Ανάλυση Κύκλου Ζωής Καλλιέργειας του Είδους <i>Nannochloropsis</i> Sp. σε Κλειστή Δεξαμενή.....	62
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	65
4.1 Μέθοδος Ανάλυσης Αποτελεσμάτων	65
4.2 Αποτελέσματα ανά Καλλιέργεια	68
4.2.1 Καλλιέργεια του είδους <i>Spirulina</i> <i>Platensis</i> σε ανοιχτή δεξαμενή	69
4.2.2 Καλλιέργεια του είδους <i>Nannochloropsis</i> Sp. σε ανοιχτή δεξαμενή	73
4.2.3 Καλλιέργεια του είδους <i>Spirulina</i> <i>Platensis</i> σε κλειστή δεξαμενή	77
4.2.4 Καλλιέργεια του είδους <i>Nannochloropsis</i> Sp. σε κλειστή δεξαμενή	81
4.3 Σύγκριση περιβαλλοντικών επιπτώσεων των τεσσάρων καλλιεργειών με το συμβατικό ντίζελ	85
4.4 Εναλλακτικά σενάρια.....	87
4.4.1 Σύγκριση περιβαλλοντικών επιπτώσεων των τεσσάρων καλλιεργειών με το συμβατικό ντίζελ (μείγμα ρεύματος από φωτοβολταϊκά συστήματα).	88
4.4.2 Σύγκριση περιβαλλοντικών επιπτώσεων των τεσσάρων καλλιεργειών με το συμβατικό ντίζελ (μείγμα ρεύματος από αιολικά συστήματα).	90
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5:ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ/ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	92
5.1 Σύγκριση των τεσσάρων καλλιεργειών	92
5.2 Σύγκριση των εναλλακτικών σεναρίων	93
5.3 Προτάσεις	93
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	95

Κατάλογος Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 1: «Κύκλος Ζωής βιοντίζελ».....	33
Διάγραμμα 2: «Αναλυτικός κύκλος ζωής βιοντίζελ από άλγη».....	43
Διάγραμμα 3: «Διάγραμμα ροής ποσοστού περιβαλλοντικών φορτίων ανά κιλό παραγόμενου βιοντίζελ για την καλλιέργεια του είδους <i>Spirulina Platensis</i> σε ανοιχτή δεξαμενή».....	69
Διάγραμμα 4: «Κατανομή περιβαλλοντικών επιβαρύνσεων σε κατηγορίες βλάβης ανά κιλό παραγόμενου βιοντίζελ για την καλλιέργεια του είδους <i>Spirulina Platensis</i> σε ανοιχτή δεξαμενή».....	71
Διάγραμμα 5: «Διάγραμμα ροής ποσοστού περιβαλλοντικών φορτίων ανά κιλό παραγόμενου βιοντίζελ για την καλλιέργεια του είδους <i>Nannochloropsis</i> Sp. σε ανοιχτή δεξαμενή».....	73
Διάγραμμα 6: «Κατανομή περιβαλλοντικών επιβαρύνσεων σε κατηγορίες βλάβης ανά κιλό παραγόμενου βιοντίζελ για την καλλιέργεια του είδους <i>Nannochloropsis</i> Sp. σε ανοιχτή δεξαμενή».....	76
Διάγραμμα 7: «Διάγραμμα ροής ποσοστού περιβαλλοντικών φορτίων ανά κιλό παραγόμενου βιοντίζελ για την καλλιέργεια του είδους <i>Spirulina Platensis</i> σε κλειστή δεξαμενή».....	78
Διάγραμμα 8: «Κατανομή περιβαλλοντικών επιβαρύνσεων σε κατηγορίες βλάβης ανά κιλό παραγόμενου βιοντίζελ για την καλλιέργεια του είδους <i>Spirulina Platensis</i> σε κλειστή δεξαμενή».....	80
Διάγραμμα 9: «Διάγραμμα ροής ποσοστού περιβαλλοντικών φορτίων ανά κιλό παραγόμενου βιοντίζελ για την καλλιέργεια του είδους <i>Nannochloropsis</i> Sp. σε κλειστή δεξαμενή».....	82
Διάγραμμα 10: «Κατανομή περιβαλλοντικών επιβαρύνσεων σε κατηγορίες βλάβης ανά κιλό παραγόμενου βιοντίζελ για την καλλιέργεια του είδους <i>Nannochloropsis</i> Sp. σε κλειστή δεξαμενή».....	84
Διάγραμμα 11: «Σύγκριση περιβαλλοντικών επιβαρύνσεων ανά κιλό παραγόμενου βιοντίζελ μεταξύ των τεσσάρων καλλιεργειών και του συμβατικού ντίζελ».....	86
Διάγραμμα 12: «Σύγκριση περιβαλλοντικών επιβαρύνσεων ανά κιλό παραγόμενου βιοντίζελ μεταξύ των τεσσάρων καλλιεργειών και του συμβατικού ντίζελ με χρήση ρεύματος που προέρχεται από φωτοβολταϊκά συστήματα».....	89
Διάγραμμα 13: «Σύγκριση περιβαλλοντικών επιβαρύνσεων ανά κιλό παραγόμενου βιοντίζελ μεταξύ των τεσσάρων καλλιεργειών και του συμβατικού ντίζελ με χρήση ρεύματος που προέρχεται από αιολικά συστήματα».....	91

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1: «Ενδεικτικές παραγωγικότητες ειδών άλγης σε ανοιχτές καλλιέργειες».....	18
Πίνακας 2: «Ενδεικτικές παραγωγικότητες ειδών άλγης σε κλειστές καλλιέργειες».....	20
Πίνακας 3: «Σύγκριση ανοιχτών και κλειστών συστημάτων παραγωγής άλγης»...22	
Πίνακας 4: «Εργαλεία ανάλυσης κύκλου ζωής».....	28
Πίνακας 5: «Εισροές και Εκροές για το στάδιο της καλλιέργειας».....	33
Πίνακας 6: «Εισροές και Εκροές για το στάδιο της Συγκομιδής και Ξήρανσης»....	35
Πίνακας 7: «Εισροές και Εκροές για το στάδιο της εκχύλισης».....	37
Πίνακας 8: «Εισροές και Εκροές για το στάδιο της μετατροπής ελαίου σε βιοντίζελ».....	38
Πίνακας 9: «Χαρακτηριστικά για το είδος <i>Spirulina Platensis</i> ».....	43
Πίνακας 10: «Συγκεντρωτικές εισροές-εκροές κάθε σταδίου για το είδος <i>Spirulina latensis</i> σε ανοιχτή δεξαμενή».....	51
Πίνακας 11: «Χαρακτηριστικά για το είδος <i>Nannochloropsis</i> sp.».....	53
Πίνακας 12: «Συγκεντρωτικές εισροές-εκροές κάθε σταδίου για το είδος <i>Nannochloropsis</i> Sp. σε ανοιχτή δεξαμενή».....	55
Πίνακας 13: «Χαρακτηριστικά λαμπτήρων».....	58
Πίνακας 14: «Συγκεντρωτικές εισροές-εκροές κάθε σταδίου για το είδος <i>Spirulina Platensis</i> σε κλειστή δεξαμενή».....	60
Πίνακας 15: «Συγκεντρωτικές εισροές-εκροές κάθε σταδίου για το είδος <i>Nannochloropsis</i> Sp. σε κλειστή δεξαμενή».....	62
Πίνακας 16: «Περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις ανά κατηγορία βλάβης για τα διαφορετικά στάδια της καλλιέργειας του <i>Spirulina Platensis</i> σε ανοιχτή δεξαμενή».....	71

Πίνακας 17: «Περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις ανά κατηγορία βλάβης για τα διαφορετικά στάδια της καλλιέργειας του <i>Nannochloropsis</i> Sp.σε ανοιχτή δεξαμενή».....	75
Πίνακας 18: «Περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις ανά κατηγορία βλάβης για τα διαφορετικά στάδια της καλλιέργειας του <i>Spirulina Platensis</i> σε κλειστή δεξαμενή».....	79
Πίνακας 19: «Περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις ανά κατηγορία βλάβης για τα διαφορετικά στάδια της καλλιέργειας του <i>Nannochloropsis</i> Sp σε κλειστή δεξαμενή».....	83
Πίνακας 20: «Περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις ανά κατηγορία βλάβης για τις τέσσερις καλλιέργειες και το συμβατικό ντίζελ».....	86
Πίνακας 21: «Περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις ανά κατηγορία βλάβης για τις τέσσερις καλλιέργειες και το συμβατικό ντίζελ (μείγμα ρεύματος από φωτοβολταϊκά συστήματα)».....	88
Πίνακας 22: «Περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις ανά κατηγορία βλάβης για τις τέσσερις καλλιέργειες και το συμβατικό ντίζελ (μείγμα ρεύματος από αιολικά συστήματα)».....	90

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Βιοκαύσιμα

Οι συνεχώς αυξανόμενες παγκόσμιες ενεργειακές απαιτήσεις σε συνδυασμό με την σταδιακή μείωση των αποθεμάτων σε ορυκτά καύσιμα όπως το κάρβουνο, το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο έχουν καταστήσει ως επιτακτική ανάγκη την ανάπτυξη των ανανεώσιμων καυσίμων. Ένας άλλος πολύ σημαντικός παράγοντας που μας οδηγεί στην χρήση ανανεώσιμων καυσίμων αποτελεί το γεγονός ότι είναι «φιλικές» προς το περιβάλλον, ενώ τα ορυκτά καύσιμα αντίθετα οξύνουν έντονα το ήδη μεγάλο περιβαλλοντικό πρόβλημα του πλανήτη μας [Sheehan et al., 1998a].

1.1.1 Τι είναι τα Βιοκαύσιμα

Ως ανανεώσιμα καύσιμα ορίζονται τα βιοκαύσιμα, τα βιορευστά και το υδρογόνο όταν αυτό προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές. Τα βιοκαύσιμα προέρχονται από οργανικά προϊόντα. Έχουν το χαρακτηριστικό των χαμηλότερων εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) στο συνολικό κύκλο ζωής τους, σε σχέση με τα συμβατικά ορυκτά καύσιμα, στοιχείο που εξαρτάται άμεσα από την προέλευση τους, τη χρήση τους αλλά και τον τρόπο παραγωγής και διανομής τους. Κατά την καύση τους τα καύσιμα αυτά εκπέμπουν περίπου ίσες ποσότητες CO_2 με τα αντίστοιχα πετρελαϊκής προέλευσης. Επειδή όμως είναι οργανικής προέλευσης ο άνθρακας τον οποίο περιέχουν έχει δεσμευτεί κατά την ανάπτυξη

της οργανικής ύλης από την ατμόσφαιρα στην οποία επανέρχεται μετά την καύση κι έτσι το ισοζύγιο εκπομπών σε όλο τον κύκλο ζωής του βιοκαυσίμου είναι θεωρητικά μηδενικό. Στην πράξη, επειδή κατά την παραγωγή και διακίνηση της πρώτης ύλης αλλά και των ίδιων των βιοκαυσίμων υπεισέρχονται και άλλες δραστηριότητες κατά τις οποίες παράγονται εκπομπές CO₂ το τελικό όφελος από τα καύσιμα αυτά μπορεί να είναι από πολύ μεγάλο έως μηδαμινό [Puhan et al., 2005].

1.1.2 Είδη Βιοκαυσίμων

Στα κυριότερα είδη βιοκαυσίμων ανήκουν τα εξής [www.desmie.gr]:

1. Βιοντίζελ (πετρέλαιο βιολογικής προέλευσης): Οι μεθυλεστέρες λιπαρών οξέων που παράγονται από φυτικά ή και ζωικά έλαια και λίπη.
2. Βιοαιθανόλη: Η αιθανόλη που παράγεται από Βιομάζα ή από το βιοαποικοδομήσιμο κλάσμα αποβλήτων.
3. Βιοαέριο: Το καύσιμο αέριο που παράγεται από Βιομάζα ή από το βιοαποικοδομήσιμο κλάσμα βιομηχανικών και αστικών αποβλήτων.
4. Βιομεθανόλη: Η μεθανόλη που παράγεται από Βιομάζα.
5. Βιοδιμεθυλαιθέρας: Ο διμεθυλαιθέρας που παράγεται από Βιομάζα.
6. Βιο-ETBE: Ο αιθυλο-τριτοταγής-βουτυλαιθέρας (ETBE) που παράγεται από βιοαιθανόλη (47%).
7. Βιο-MTBE: Ο μεθυλο-τριτοταγής-βουτυλαιθέρας (MTBE) που παράγεται από βιομεθανόλη (36%).

8. Συνθετικά βιοκαύσιμα: Οι συνθετικοί υδρογονάνθρακες ή τα μίγματα συνθετικών υδρογονανθράκων που παράγονται από Βιομάζα.
9. Βιοϋδρογόνο: Το υδρογόνο που παράγεται από Βιομάζα ή βιοαποικοδομήσιμο κλάσμα βιομηχανικών και αστικών αποβλήτων.
10. Καθαρά Φυτικά Έλαια: Τα έλαια που παράγονται από ελαιούχα φυτά μέσω συμπίεσης, έκθλιψης ή ανάλογων μεθόδων, φυσικά ή εξευγενισμένα αλλά μη χημικώς τροποποιημένα.

1.1.3 Γενιές Βιοκαυσίμων

Τα βιοκαύσιμα διακρίνονται σε :

Πρώτης γενιάς: Στόχος τους είναι η παραγωγή βιοκαυσίμων από διαθέσιμες πρώτες ύλες. Προέρχονται από φυτικά έλαια, ζωικά λίπη, σάκχαρα, άμυλο, απόβλητα και υπολειμματική βιομάζα, καθώς και στερεή βιομάζα. Το βασικό μειονέκτημα τους είναι ότι η πλειονότητα των πρώτων υλών τους αποτελεί κομμάτι της τροφικής αλυσίδας και συνεπώς η χρήση τους για βιοκαύσιμα μειώνει την διαθεσιμότητα των τροφών και την διατήρηση της βιοποικιλότητας. Ένα επιπλέον μειονέκτημα είναι ότι δημιουργούνται ανεπιθύμητα παραπροϊόντα κατά την παραγωγή τους.

Δεύτερης γενιάς: Στόχος τους είναι η παραγωγή βιοκαυσίμων με χρήση πρώτων υλών που δεν χρησιμοποιούνται για τροφές. Προέρχονται από απόβλητα και υπολειμματικά φυτικά έλαια και ζωικά λίπη, κυτταρινούχα φυτά, πρώτες ύλες που δεν χρησιμοποιούνται ως τροφές, καθώς και απόβλητα και υπολειμματική βιομάζα.

Τα μειονεκτήματά της συγκεκριμένης γενιάς είναι η μειωμένη διαθεσιμότητα των απαιτούμενων πρώτων υλών, εκτάσεων και υδάτων για την καλλιέργεια.

Τρίτης γενιάς: Στόχος τους είναι η αύξηση της απόδοσης παραγωγής των πρώτων υλών. Προέρχονται αποκλειστικά από μεγάλης στρεμματικής απόδοσης βιομάζα (άλγη – μικροφύκη). Τα κύρια πλεονεκτήματα της παραγωγής βιοκαυσίμων από μικροφύκη είναι καταρχάς η χρήση διοξειδίου του άνθρακα ως θρεπτική ύλη για την ανάπτυξη τους και εν συνεχεία η μεγάλη ενεργειακή απόδοση ανά μονάδα καλλιεργούμενης έκτασης. Συγκριτικά με τις άλλες καλλιέργειες μπορεί να αποδώσει έως και τριάντα φορές περισσότερη ενέργεια σύμφωνα με έρευνες.

Τέταρτης γενιάς: Στόχος τους είναι η ανάπτυξη βιομάζας με αυξημένη δέσμευση CO₂ αλλά και διεργασιών παραγωγής βιοκαυσίμων αρνητικού άνθρακα με γεω-αποθήκευση CO₂.

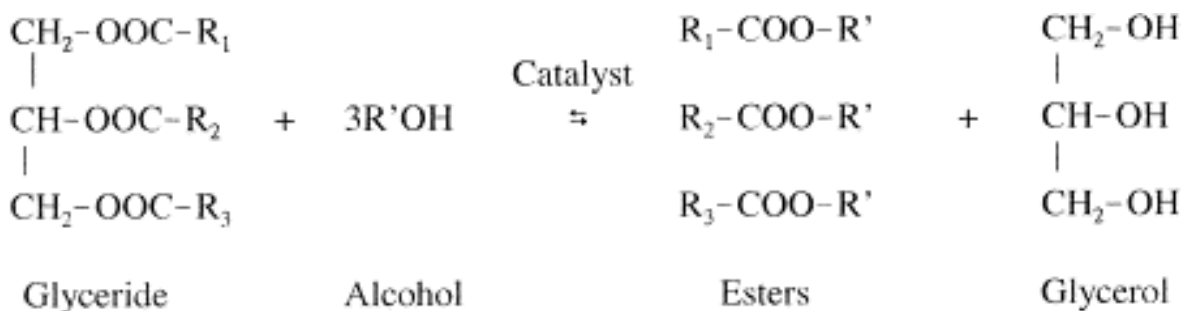
1.2 Βιοντίζελ

1.2.1 Τι είναι το βιοντίζελ

Το βιοντίζελ είναι ένα υποσχόμενο βιοκαύσιμο, το οποίο προέρχεται από φυτικά έλαια και ζωικά λίπη. Αποτελεί ένα από τα πιο διαδεδομένα βιοκαύσιμα, καθώς διαθέτει παρόμοιες φυσικές ιδιότητες με το συμβατικό ντίζελ και συνεπώς μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε αυτούσιο, είτε σε διάφορες αναλογίες με το πετρελαϊκό ντίζελ στις πετρελαιομηχανές. Προέρχεται από βιοκαύσιμα πρώτης (π.χ ελαιοκράμβη, σόγια, ηλίανθο), δεύτερης (π.χ. χρησιμοποιημένα έλαια, αστικά απόβλητα) και τρίτης γενιάς (π.χ. μικροφύκη) [www.ypeka.gr].

1.2.1 Πως παράγεται το βιοντίζελ

Η πιο διαδεδομένη μέθοδος παραγωγής βιοντίζελ είναι αυτή της μετεστεροποίησης των τριγλυκεριδίων και της εστεροποίησης των ελεύθερων λιπαρών οξέων με κάποια αλκοόλη (συνήθως την μεθανόλη). Παρακάτω φαίνεται η αντίδραση μετεστεροποίησης τριγλυκεριδίων με αλκοόλη.



Γενικά ως μετεστεροποίηση ορίζεται η αντίδραση μεταξύ ενός εστέρα και μίας αλκοόλης προς το σχηματισμό ενός νέου εστέρα και μιας δεύτερης αλκοόλης.

Τα τριγλυκερίδια (TAGs) είναι οι τριεστέρες της γλυκερόλης (1,2,3 προπανοτριόλη) με λιπαρά οξέα. Αποτελούν κύριο συστατικό των φυτικών ελαίων και ζωικών λιπών σε ποσοστό που ανέρχεται έως και 98%.

Κατά την μετεστεροποίηση ο τριεστέρας της γλυκερόλης αντιδρά με την αλκοόλη και παράγεται ένα μίγμα εστέρων της αλκοόλης με τα λιπαρά οξέα του τριεστέρα, οι οποίοι αποτελούν το βιοντίζελ και την γλυκερίνη. Η αλκοόλη προστίθεται πάντα σε περίσσεια με σκοπό την επίτευξη υψηλών βαθμών μετατροπής και υψηλής απόδοσης βιοντίζελ. Παρόλο που η στοιχειομετρική μοριακή αναλογία αλκοόλης – ελαίου είναι 3:1, η αναλογία που χρησιμοποιείται στην πράξη είναι αρκετά μεγαλύτερη και εξαρτάται επίσης και από το είδος του καταλύτη που χρησιμοποιείται. Ως αλκοόλη χρησιμοποιείται συνήθως η μεθανόλη λόγω του χαμηλού κόστους της και των φυσικοχημικών ιδιοτήτων της. Οι συνηθέστεροι καταλύτες είναι το υδροξείδιο του νατρίου και το υδροξείδιο του

καλίου. Τέλος οι παράμετροι που επηρεάζουν την αντίδραση της μετεστεροποίησης είναι η θερμοκρασία αντίδρασης, η μοριακή αναλογία αλκοόλης – ελαίου, το είδος και η ποσότητα του καταλύτη, ο ρυθμός ανάδευσης, η σύσταση και η καθαρότητα του αντιδρώντος μίγματος [Fangrui, 1999].

1.2.2 Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα

a) Πλεονεκτήματα

Το βιοντίζελ, σε σύγκριση με το συμβατικό ντίζελ, διαθέτει υψηλότερο σημείο ανάφλεξης, κάτι το οποίο το καθιστά ασφαλέστερο κατά την χρήση του, καθώς και πολύ μικρότερη ποσότητα θείου, συνεπώς είναι ασφαλέστερο για την υγεία και το περιβάλλον. Επιπλέον διαθέτει μεγαλύτερη λιπαντική ικανότητα και μεγαλύτερο αριθμό κετανίων σε σχέση με το απλό ντίζελ. Τέλος όπως αναφέραμε και νωρίτερα οι εκπομπές CO₂ στον συνολικό κύκλο ζωής του είναι πολύ μικρότερες από αυτές του ντίζελ.

b) Μειονεκτήματα

1. Μικρότερη θερμογόνος δύναμη και υψηλότερο ιξώδες σε σχέση με το συμβατικό ντίζελ,
2. Μεγαλύτερες εκπομπές NO_x (μικρή διαφορά),
3. Υψηλότερο κόστος έναντι του ντίζελ,
4. Η καταστροφή των οικοσυστημάτων και η υπερκατανάλωση απαραίτητων στοιχείων της τροφικής αλυσίδας,
5. Παραγωγή γλυκερίνης ως παραπροϊόν,
6. Η χρήση της μεθανόλης για την παραγωγή του.

1.3 Άλγη

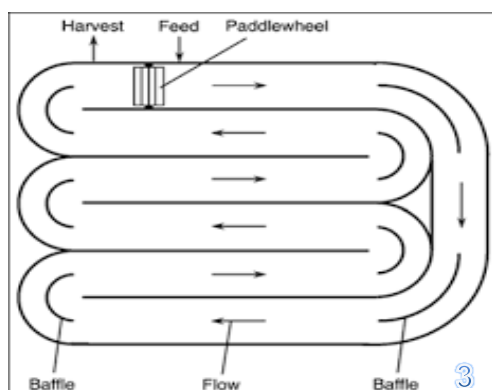
Τα άλγη αποτελούν μικροοργανισμούς που αναπτύσσονται ταχύτατα και οι οποίοι μετατρέπουν το φως σε χημική ενέργεια. Τα μικροάλγη συμπεριλαμβανομένων των μονοκυτταρικών αλγών και των κυανοβακτηρίων αναπτύσσονται στο νερό και παράγουν πρωτεΐνες και λιπίδια τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για βιο-προϊόντα και βιοκαύσιμα. Η πρώτη μεγάλης εμπορικής κλίμακας καλλιέργεια άλγης πραγματοποιήθηκε στις αρχές του 1960 στη Ιαπωνία με την καλλιέργεια του είδους *Chlorella* [Tsukada et al., 1977] και εν συνεχεία στις αρχές του 1970 με την καλλιέργεια του είδους *Spirulina* στην λίμνη Texcoco στο Μεξικό [Durand-Chastel, 1980]. Φυσικά δεν μπορούν όλα τα άλγη να καλλιεργηθούν σε επεκτατική μορφή. Η καλλιέργεια της βασίζεται στην αρχή της φωτοσύνθεσης, συνεπώς τα πιο βασικά συστατικά είναι το φως, το νερό, η θερμοκρασία και το CO₂. Σημαντικό ρόλο παίζουν βέβαια και τα θρεπτικά συστατικά. Η μελέτη βιοκαυσίμων που προέρχονται από μικροάλγη αποτελεί μία ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα εναλλακτική κυρίως για τους παρακάτω λόγους:

- Έχει την δυνατότητα να πραγματοποιεί έναν αναπαραγωγικό κύκλο μέσα σε διάστημα ωρών ή ημερών, κάτι το οποίο καθιστά δυνατή την συγκομιδή της σε καθημερινή βάση.
- Η παραγωγικότητα λαδιού πολλών ειδών είναι αρκετά μεγαλύτερη σε σύγκριση με αυτήν άλλων ελαιούχων φυτών.

Δύο είναι τα κύρια συστήματα καλλιέργειας άλγης στις μέρες μας. Τα ανοικτά συστήματα (open pond) και τα κλειστά συστήματα – φωτοβιοαντιδραστήρες (close ponds – photobioreactors systems) [Shih-Hsin, 2011].

1.3.1 Ανοιχτά συστήματα καλλιέργειας (Open ponds)

Τα ανοιχτά συστήματα (open ponds) αποτελούν τα πιο διαδεδομένα παγκοσμίως, λόγω της απλότητας τους και της ευκολίας κατασκευής τους σε επεκτατική μορφή. Αποτελούνται από αβαθείς λίμνες οι οποίες είναι εκτεθειμένες στην ατμόσφαιρα. Οι πιο κοινοί τύποι τέτοιων λιμνών είναι οι κυκλικές (circular, Εικόνα 1) και τα τεχνητά κανάλια ελισσόμενου στίβου (raceway ponds, Εικόνα 2,3). Τα βάθη των κυκλικών δεξαμενών κυμαίνονται από 30–70 cm [Moheimani and Borowitzka, 2006], ενώ από την άλλη τα βάθη των τεχνητών καναλιών ελισσόμενου στίβου διαμορφώνονται ανάμεσα στα 15-40 cm [Becker,1994]. Τα κανάλια είναι κατασκευασμένα είτε από μπετόν, είτε από συμπιεσμένο χώμα επενδυμένο με πλαστικό. Το νερό κυκλοφορεί εντός των καναλιών με τη βοήθεια ενός τροχού, ο οποίος εξασφαλίζει την επαρκή ανάμειξη των στοιχείων του νερού και την αποφυγή καθίζησης της άλγης. Οι επιθυμητές ταχύτητες ανάδευσης κυμαίνονται από 10–20 cm/s [Benemann, 2008].



Εικόνα 1:Κυκλικές καλλιέργειες

Εικόνα 2,3 : Τεχνητά κανάλια ελισσόμενου στίβου.

Πίνακας 1:

Ενδεικτικές παραγωγικότητες ειδών άλγης σε ανοιχτές καλλιέργειες [Leslie, 2012].

Τύπος Δεξαμενής	Συνολικός Όγκος (L)	Είδος	Επιφανειακή Παραγωγικότητα $\text{g} \times \text{m}^{-2} \times \text{d}^{-1}$	Ογκομετρική Παραγωγικότητα $\text{g} \times \text{L}^{-1} \times \text{d}^{-1}$	Πηγή
Circular	1.960	Chlorella sp.	1,61-16,47	0,02-0,16	Kanazawa et al. (1958)
		Scenedesmus sp.	2,43-13,52	0,03-0,13	
Sloped	1.970	Chlorella sp.	25	10	Lee (2001)
Sloped	1.990	Scenedesmus obliquus	24,8	-	Becker (1994)
Raceway	282	Spirulina platensis	14,47	0,183	Pushparaj et al. (1997)
Raceway	300	Anabaena sp.	9,4-23,5	0,031-0,078	Moreno et al. (2003)
Raceway	135.000	Spirulina sp.	2-17	0,006-0,07	Jimenez et al. (2003)
Raceway	750	Spirulina platensis	15-27	0,06-0,18	Richmond et al. (1990)
Raceway	4.150	Phaeodactylum tricornutum	2,4-11,3	0,0028-0,13	Laws et al. (1988)

Το βασικό μειονέκτημα των ανοιχτών συστημάτων καλλιέργειας είναι ότι βρίσκονται εκτεθειμένα στην ατμόσφαιρα και συνεπώς σε όλα τα περιβαλλοντικά φαινόμενα αλλά και τα υπόλοιπα στοιχεία της φύσης, κάτι το οποίο καθιστά δύσκολο τον έλεγχο της καλλιέργειας. (π.χ. Λόγω ανέμων μεταφέρονται ακαθαρσίες μέσα στην τεχνητή λίμνη, οι οποίες εμποδίζουν την σωστή αναπαραγωγή της άλγης) [Borowitzka, 1999].

1.3.2 Κλειστά συστήματα καλλιέργειας (Close ponds)

Τα κλειστά συστήματα ή φωτοβιοαντιδραστήρες (PRB) όπως ονομάζονται αναπτύχθηκαν με σκοπό τον έλεγχο των διαφόρων προβλημάτων που υπάρχουν στα ανοιχτά συστήματα, όπως για παράδειγμα η αποφυγή μόλυνσης από κάποιου είδους βακτηρίου ή μικροοργανισμού. Οι φωτοβιοαντιδραστήρες είναι στην ουσία διαφανή δοχεία τα οποία έχουν σχεδιαστεί με σκοπό να αυξήσουν την ποσότητα του φωτός που φτάνει στα κύτταρα της άλγης και να μεγιστοποιήσουν την δυνατή διανομή θρεπτικών συστατικών και ανταλλαγής διοξειδίου του άνθρακα. Όλα τα παραπάνω έχουν ως τελικό στόχο την αύξηση την παραγωγικότητας της άλγης [Borowitzka, 1999].

Τα κλειστά αυτά συστήματα διακρίνονται σε δύο υποκατηγορίες: τους εσωτερικούς φωτοβιοαντιδραστήρες, οι οποίοι απαιτούν τεχνητό φως για την λειτουργία τους και τους εξωτερικούς, οι οποίοι εκμεταλλεύονται την ηλιακή ενέργεια. Τα δύο συνηθέστερα είδη τέτοιων αντιδραστήρων που συναντάμε είναι οι σωληνοειδής (tubular photobioreactors, Εικόνα 1) και οι επίπεδης πλάκας (Flat-plate photobioreactors, Εικόνα 2). Υπάρχουν φυσικά πολλοί ακόμα διαφορετικοί τύποι φωτοβιοαντιδραστήρων για την καλλιέργεια άλγης. Κοινό χαρακτηριστικό όλων όμως αποτελεί το γεγονός ότι σε αντίθεση με τα ανοιχτά συστήματα, στα κλειστά είναι απαραίτητη η εισαγωγή διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) για την

λειτουργία τους, καθώς αυτό δεν προσλαμβάνεται πλέον από την ατμόσφαιρα. Για τον λόγο αυτό οι μονάδες φωτοβιοαντιδραστήρων μπορούν να συνδεθούν με εργοστάσια παραγωγής λιγνίτη για παράδειγμα και να συγκεντρώσουν το απαιτούμενο διοξείδιο του άνθρακα για την λειτουργία τους σε μορφή βιομηχανικού κατάλοιπου [Leslie, 2012.].

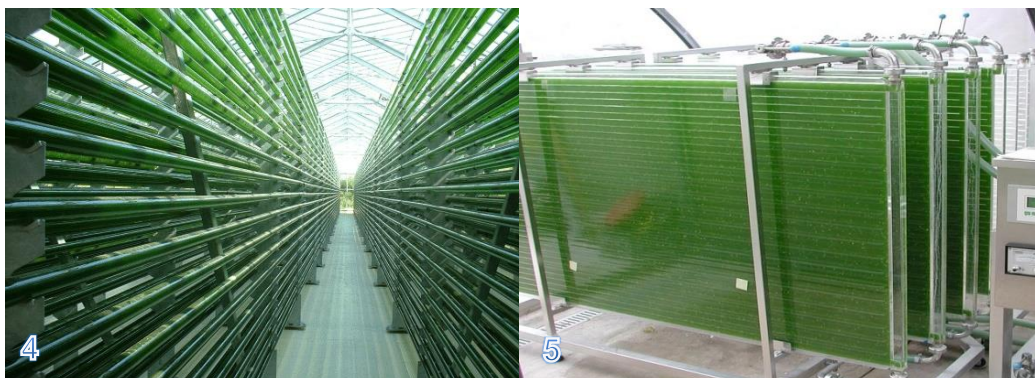
Πίνακας 2:

Ενδεικτικές παραγωγικότητες ειδών άλγης σε φωτοβιοαντιδραστήρες [Leslie, 2012].

Τύπος Δεξαμενής	Συνολικός Όγκος (L)	Είδος	Ογκομετρική Παραγωγικότητα $\text{g} \times \text{L}^{-1} \times \text{d}^{-1}$	Πηγή
Airlift Tubular	200	Porphyridium cruentum	1,50	Camacho Rubio et al. (1999)
Airlift Tubular	200	Phaeodactylum tricornutum	1,20	Acien Fernandez et al. (2001)
Airlift Tubular	200	Phaeodactylum tricornutum	1,90	Molina et al. (2001)
Inclined Tubular	6	Chlorella sorokiniana	1,47	Ugwu et al. (2002)
Undular Row Tubular	11	Arthrospira platensis	2,70	Carlozzi (2003)
Outdoor Helical Tubular	75	Phaeodactylum tricornutum	1,40	Hall et al. (2003)
Parallel Tubular	25.000	Haematococcus pluvialis	0,05	Olaizola (2000)
Bubble - Column	55	Haematococcus pluvialis	0,06	Lopez et al. (2006)

Flat Plate	440	Nannochloropsis sp.	0,27	Cheng-Wu et al. (2001)
Flat Plate	100	Nannochloropsis sp.	0,30	Rodolfi et al. (2009)

Ένα από τα βασικά μειονεκτήματα των φωτοβιοαντιδραστήρων είναι ότι κατά την λειτουργία τους δημιουργούνται συχνά λεπτά στρώματα άλγης, τα οποία προσκολλούνται στα τοιχώματα, με αποτέλεσμα να εμποδίζουν το φως να φτάσει στο εσωτερικό και συνεπώς να διακόπτεται η διαδικασία της φωτοσύνθεσης. Η αποφυγή τέτοιων περιστατικών απαιτεί τον συνεχή εσωτερικό καθαρισμό των αντιδραστήρων. Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζονται δύο είδη φωτοβιοαντιδραστήρων, σωληνοειδής και επίπεδης πλάκας.



Εικόνα 4:Σωληνοειδής Φωτοβιοαντιδραστήρες, Εικόνα 5:Επίπεδης Πλάκας

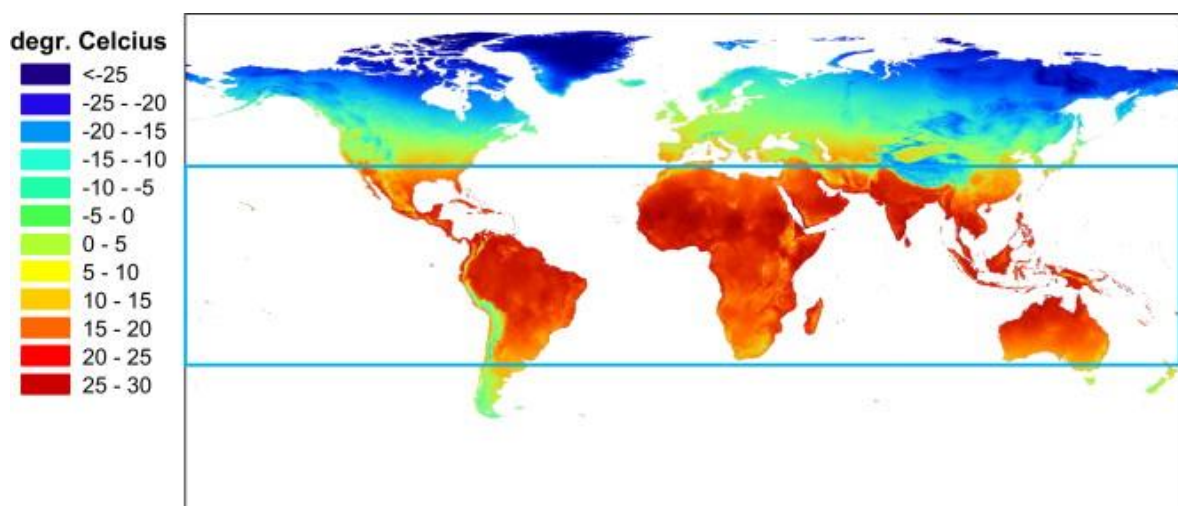
Παρακάτω γίνεται σύγκριση μεταξύ των ανοιχτών και κλειστών συστημάτων καλλιέργειας σε κάποιους βασικούς τομείς [Leslie, 2012].

Πίνακας 3: Σύγκριση ανοιχτών και κλειστών συστημάτων παραγωγής άλγης.

Παράμετρος	Ανοιχτό σύστημα	Κλειστό σύστημα	Παραπομπή
Εύκολη επέκταση	Μεγαλύτερη	Μικρότερη	Shen et al. (2009)
Εξάτμιση νερού	Μεγάλη (περίπου 1% την ημέρα μεσοσταθμικά)	Λιγότερη (περίπου 0,1% την ημέρα μεσοσταθμικά)	Becker (1994)
Χρήση γης	Υψηλότερη	Μικρότερη	Borowitzka (1999)
Κίνδυνοι μόλυνσης	Σημαντικοί	Λιγότεροι	Borowitzka (1999)
Παραγωγικότητα	Χαμηλή	Υψηλή	Borowitzka (1999)
Σταθεροποίηση Παραγωγικότητας	Περισσότερο ευμετάβλητη	Λιγότερο ευμετάβλητη	Shen et al. (2009)
Απώλειες CO ₂	Υψηλές	Χαμηλές	Becker (1994)

1.3.3 Θερμοκρασία

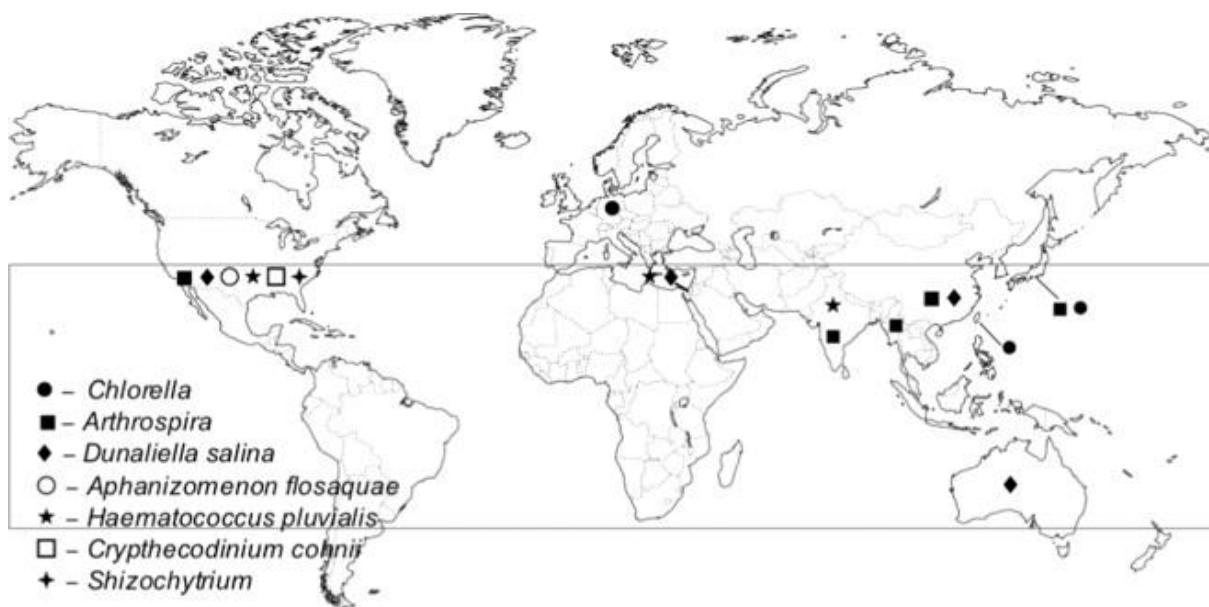
Ένας πολύ σημαντικός παράγοντας για την αναπαραγωγή της άλγης είναι η θερμοκρασία. Τα θερμοκρασιακά όρια μέσα στα οποία αναπτύσσεται, κυμαίνονται από 16 έως 27°C, ίσως και λίγο παραπάνω. Εάν η θερμοκρασία ξεφύγει από αυτά τα όρια σταματάει η διαδικασία της φωτοσύνθεσης και υπάρχει ακόμα και ο κίνδυνος για καταστροφή της καλλιέργειας σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες για παράδειγμα. Τα όρια αυτά στους εσωτερικούς φωτοβιοαντιδραστήρες μπορούν να διατηρηθούν με τεχνητά μέσα, τα οποία βέβαια είναι αρκετά ενεργοβόρα. Στους εξωτερικούς όμως δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί κάτι τέτοιο, συνεπώς απαιτείται η τοποθέτησή τους σε συγκεκριμένες γεωγραφικές περιοχές της γης στις οποίες επικρατούν ευνοϊκότερες θερμοκρασίες. Στον παρακάτω χάρτη βλέπουμε ότι οι περιοχές που βρίσκονται ανάμεσα στις δύο γραμμές αποτελούν τις καλύτερες δυνατές επιλογές για εγκατάσταση καλλιέργειας άλγης. Όπως παρατηρούμε η Κρήτη βρίσκεται μέσα σε αυτή τη ζώνη και συνεπώς οι κλιματολογικές της συνθήκες θα ευνοούσαν μια τέτοια εγκατάσταση [Van Harmelen and Oonk, 2006].



Εικόνα 6: Παγκόσμια μέση ετήσια θερμοκρασία για το έτος 2005 [Van Harmelen and Oonk, 2006].

1.4 Ελληνική και διεθνής πραγματικότητα

Αν και σε επιστημονικό επίπεδο πραγματοποιούνται αρκετές έρευνες σε όλο τον κόσμο για την παραγωγή άλγης, σε βιομηχανικό επίπεδο τα πράγματα είναι ακόμα σε πρώιμο στάδιο, καθώς προκύπτει η ανάγκη πιο οικονομικών και ανταγωνιστικών μεθόδων καλλιέργειας άλγης.



Εικόνα 7: Διεθνής παραγωγή άλγης το έτος 2005 [Van Harmelen and Oonk, 2006].

Όπως παρατηρούμε και στην παραπάνω εικόνα, οι κύριες περιοχές στις οποίες συναντάμε βιομηχανική παραγωγή άλγης για την δημιουργία ζωοτροφών, προϊόντων υδατοκαλλιέργειας και καλλυντικά είναι η Κίνα, η Αμερική, η Ινδία, το Ισραήλ και η Γερμανία. Η ετήσια παραγωγή ξηρής βιομάζας (dry mass) κυμαίνεται γύρω στους 7.500 τόνους, με βάση μελέτη που δημοσιεύθηκε το 2005. Στην Ελλάδα υπάρχουν μόνο τρεις εταιρείες, οι οποίες αυτή τη στιγμή εξειδικεύονται στην παραγωγή άλγης [Ademola, 2013].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΥΚΛΟΥ ΖΩΗΣ

2.1 Τι είναι η ανάλυση κύκλου ζωής

Ο στόχος της επίτευξης «βιώσιμης ανάπτυξης» απαιτεί μεθόδους, οι οποίες θα βοηθήσουν στην ποσοτικοποίηση και σύγκριση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των διαφόρων προϊόντων και υπηρεσιών που υπάρχουν στις κοινωνίες μας. Μια τέτοια μέθοδος είναι ανάλυση κύκλου ζωής. Η ανάλυση κύκλου ζωής είναι ένα εργαλείο για την αξιολόγηση των πιθανών περιβαλλοντικών επιπτώσεων και των πόρων που χρησιμοποιούνται σε όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής ενός προϊόντος από την απόκτηση των πρώτων υλών μέχρι τη διαχείριση των αποβλήτων. Η αλλαγή του κλίματος, η εξάντληση του στρατοσφαιρικού όζοντος, η δημιουργία αιθαλομίχλης, ο ευτροφισμός, η τοξικολογική επιβάρυνση του ανθρώπου και του οικοσυστήματος, η εξάντληση των πόρων, η χρήση γης και υδάτων αλλά και ο θόρυβος είναι κάποιες από τις επιπτώσεις τις οποίες εξετάζει η ΑΚΖ. Σκοπός της είναι η τελική αξιολόγηση των δυνατοτήτων περιορισμού των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που υπάρχουν, σε συνδυασμό πάντα με την ορθολογική χρήση ενέργειας και πρώτων υλών [United Nations Environment Programme]. Σε μια μελέτη ανάλυσης κύκλου ζωής υπάρχουν τέσσερις φάσεις:

1. Καθορισμός στόχου και αντικειμένου
2. Καταγραφή κύκλου ζωής (LCI)
3. Ανάλυση επιπτώσεων κύκλου ζωής (LCIA)
4. Ερμηνεία αποτελεσμάτων

2.1.1 Στάδια ανάλυσης κύκλου ζωής

Καθορισμός στόχου και αντικειμένου (Goal and Scope)

Το στάδιο αυτό περιλαμβάνει αρχικά τους λόγους διεξαγωγής της μελέτης. Στη συνέχεια γίνεται περιγραφή του συστήματος και καθορισμός των ορίων του. Ορίζεται η λειτουργική μονάδα, η οποία αποτελεί ένα ποσοτικό μέτρο των λειτουργιών που παρέχουν τα διάφορα αγαθά. Επιπλέον γίνεται προσδιορισμός του κοινού στο οποίο απευθύνεται, αλλά και της μορφής της έκθεσης που απαιτείται για την μελέτη. Όλα τα παραπάνω μας βοηθούν να βεβαιωθούμε ότι έχουμε πραγματοποιήσει μια ολοκληρωμένη και σωστή ανάλυση κύκλου ζωής [Rebitzer,2004].

Καταγραφή κύκλου ζωής (Life Cycle Inventory)

Η καταγραφή κύκλου ζωής είναι μια μεθοδολογία για την εκτίμηση της κατανάλωσης των πόρων και της ποσότητας των ροών αποβλήτων και των εκπομπών που προκαλούνται από τον κύκλο ζωής ενός προϊόντος. Η κατανάλωση των πόρων και η παραγωγή αποβλήτων ή εκπομπών μπορεί να λάβουν χώρα σε πολλαπλές περιοχές του κόσμου και σε διαφορετικές χρονικές στιγμές. Επιπλέον μπορεί να εκδηλωθούν σε διαφορετικές χρονικές περιόδους, για παράδειγμα η υγειονομική ταφή μπορεί να έχει επιπτώσεις στην παρούσα αλλά και σε επερχόμενες γενιές. Οι διαδικασίες εντός του κύκλου ζωής, οι σχετικές ροές υλικών και ενέργειας αλλά και διάφορες άλλες διεργασίες μοντελοποιούνται, έτσι ώστε να αποτυπώνουν το σύστημα παραγωγής αλλά και τις συνολικές ροές αυτού από και προς το φυσικό περιβάλλον. Αυτό το στάδιο λοιπόν απαιτεί μια μεγάλη συλλογή και καταγραφή δεδομένων, η οποία συνήθως αποτελεί το πιο χρονοβόρο κομμάτι της ανάλυσης κύκλου ζωής [Finnveden, 2009].

Ανάλυση επιπτώσεων κύκλου ζωής (Life Cycle Impact Assessment - LCIA)

Στο στάδιο αυτό παρέχονται δείκτες συσχέτισης μεταξύ της εκμετάλλευσης πόρων-εξαγωγής αποβλήτων/εκπομπών και των περιβαλλοντικών επιπτώσεων για διάφορες κατηγορίες, όπως για παράδειγμα είναι η κλιματική αλλαγή, ο θόρυβος και η χρήση γης. Σύμφωνα με το ISO 2006 στο στάδιο αυτό περιλαμβάνεται :

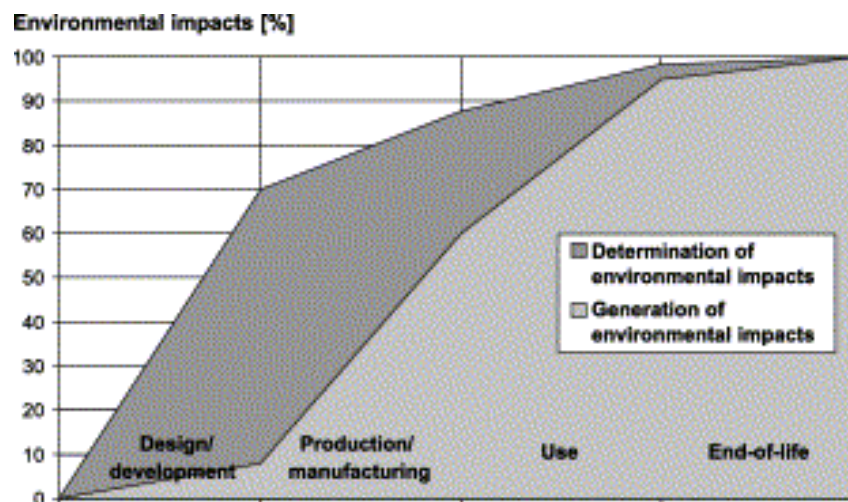
1. Η επιλογή των κατηγοριών των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που θα εξετασθούν και η ταξινόμηση αυτών που προέκυψαν από την μελέτη σε αυτές.
2. Η επιλογή των μεθόδων χαρακτηρισμού. Για παράδειγμα το δυναμικό υπερθέρμανσης του πλανήτη για χρονικό ορίζοντα 100 ετών αποτελεί συχνά παράγοντα χαρακτηρισμού της κλιματικής αλλαγής.
3. Κανονικοποίηση – Ομαλοποίηση με σκοπό τη διευκόλυνση της ερμηνείας των αποτελεσμάτων.
4. Ομαδοποίηση
5. Στάθμιση

Τα δύο τελευταία στάδια είναι προαιρετικά βέβαια [Rebitzer, 2004].

Ερμηνεία (Interpretation)

Στο τελευταίο αυτό στάδιο, καταγράφονται και ερμηνεύονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης του κύκλου ζωής του προϊόντος και γίνονται εκτιμήσεις για τυχόν βελτιώσεις, με σκοπό την μείωση των ενδεχόμενων περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται μία

γενικευμένη αναπαράσταση της προέλευσης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων στον κύκλο ζωής ενός προϊόντος [Rebitzer, 2002].



Εικόνα 8: Γενικευμένη αναπαράσταση της προέλευσης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων στον κύκλο ζωής ενός προϊόντος [Rebitzer, 2002].

2.2 Εργαλεία Ανάλυσης Κύκλου Ζωής

Υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός εργαλείων ανάλυσης κύκλου ζωής. Παρακάτω παρουσιάζονται τα πιο γνωστά εξ' αυτών.

Πίνακας 4: Εργαλεία ανάλυσης κύκλου ζωής [Lehtinen, 2009].

SimaPro 7	Gabi 5	Umberto	Quantis Suite 2.0	EarthSmart	Sustainable Minds
Enviance System 6.4	LinkCycle Footprinter	Wrate	Regis 2.3	OpenLCA	Legep 1.2
BEES 4.0	CCaLC Tool	eVerdEE v.2.0	AIST-LCA Ver.4	TEAM™ 5.2	KCL-ECO 5

2.3 SimaPro 7

Το λογισμικό *SimaPro7* δημιουργήθηκε και διατίθεται από την *PreConsultants B.V.*. Πρόκειται για ένα λογισμικό ευρέως διαδομένο, το οποίο διαθέτει μερικές πολύ εξειδικευμένες διεργασίες, παραμένοντας όμως αρκετά εύχρηστο. Παρέχει τη δυνατότητα παράλληλης μελέτης διαφορετικών μεθόδων ανάλυσης αντίκτυπου ζωής (LCIA). Επίσης διαθέτει εργαλεία, τα οποία επιτρέπουν να οριστεί ο κύκλος ζωής με περισσότερη ακρίβεια, προσθέτοντας τα σημαντικότερα δεδομένα, ενώ είναι αρκετά εύχρηστο στην παρουσίαση των αποτελεσμάτων, καθώς εμφανίζει ως αποτελέσματα σημαντικές πληροφορίες όπως τις σημαντικότερες εκπομπές ή διαδικασίες κ.α.. Διαθέτει μεγάλο όγκο διαθέσιμων δεδομένων, καθώς υπάρχει δυνατότητα χρησιμοποίησης διαφόρων βιβλιοθηκών ταυτόχρονα.

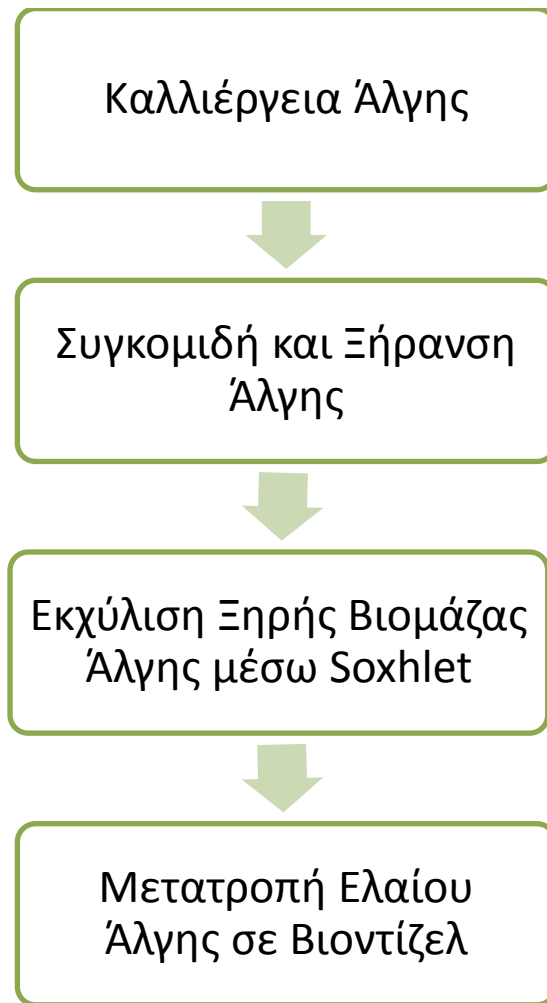
Το λογισμικό *SimaPro7* παρέχει τη δυνατότητα αξιοποίησης των δεδομένων χρησιμοποιώντας αυτά, είτε ως σύστημα δεδομένων, είτε ως ξεχωριστές μονάδες, τόσο στα δεδομένα εισόδου, όσο και στα δεδομένα εξόδου. Η παρουσίαση των αποτελεσμάτων μπορεί να περιοριστεί, αποφεύγοντας τη παρουσίαση δεδομένων εξόδου, με πολύ μικρή συνεισφορά στο συνολικό περιβαλλοντικό φορτίο, με όρια που μπορεί να επιλέξει ο χρήστης. Επίσης, τα δεδομένα εξόδου κατατάσσονται ανάλογα με τον αποδέκτη των εκπομπών (εκπομπές σε υδάτινο περιβάλλον, εκπομπές στην ατμόσφαιρα και εκπομπές στο έδαφος), αλλά και ανάλογα με τον αποδέκτη των αποβλήτων με τη χρήση του εργαλείου διαχείρισης αποβλήτων. Τα αποτελέσματα μπορούν να παρουσιαστούν με διαφορετικούς τρόπους, ανάλογα με τις απαιτήσεις, είναι εφικτό να επιλέξουμε τη παρουσίαση μόνο των αποτελεσμάτων που συνεισφέρουν σε μία συγκεκριμένη κατηγορία ευρείας επίδρασης.

Στις εφαρμογές του λογισμικού, περιέχονται περισσότερες από δέκα τυποποιημένες διεργασίες για το σχεδιασμό της ανάλυσης αντίκτυπου του κύκλου ζωής, που μπορούν να χρησιμοποιηθούν, ενώ υπάρχει και η δυνατότητα δημιουργίας νέας διεργασίας σύμφωνα με τις ανάγκες του χρήστη. Μέσω του προγράμματος μπορούμε να συγκρίνουμε τα αποτελέσματα από δύο ή περισσότερες εκδοχές του αντικειμένου μελέτης μας, με διαφορετικές παραμέτρους παραγωγής, καθώς τα γραφήματα των αποτελεσμάτων αναλύονται και παρουσιάζονται οι διαφορές μεταξύ των διαφόρων εκδοχών. Τα υπάρχοντα δεδομένα των βιβλιοθηκών, που χρησιμοποιούνται από το πρόγραμμα, είναι οργανωμένα σε ξεχωριστές βιβλιοθήκες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε κάθε διεργασία. Τα ήδη υπάρχοντα δεδομένα, μαζί με τα παραγόμενα αποτελέσματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μελλοντικές έρευνες.

Επιπλέον εκτός από τη δυνατότητα ανάλυσης κύκλου ζωής ενός αντικειμένου, περιέχονται και άλλα εργαλεία όπως *Design for environment (DfE, DfR)*, *Life cycle assessment (LCA)*, *Life cycle costing (LCC)*, *Life cycle impact assessment (LCIA)*, *Life cycle inventory (LCI)*, *Life cycle management (LCM)*, *Life cycle sustainability assessment (LCS)*, *Life cycle work environment (LCWE)*, *Life cycle engineering (LCE)*, *Product stewardship*, *supply chain management*, *Substance/material flow analysis (SFA/MFA)* [The European Commission's Directory of LCA services,2007].

2.4 Ορισμός Κύκλου Ζωής

Ο κύκλος ζωής του βιοντίζελ ορίστηκε όπως φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα από τέσσερα βασικά στάδια. Αρχικό στάδιο αποτελεί η καλλιέργεια της άλγης (cultivation). Στην συνέχεια μια συγκεκριμένη ποσότητα άλγης που βρίσκεται στην δεξαμενή οδηγείται για ξήρανση (harvesting-drying). Η ξηρή βιομάζα άλγης (dry algae biomass) που συλλέγεται, οδηγείται στην διαδικασία εκχύλισης, με τη βοήθεια συσκευών Soxhlet, η οποία αποτελεί το τρίτο κύριο στάδιο της διαδικασίας. Τέλος, ακολουθεί το τελευταίο στάδιο, κατά το οποίο το λάδι που προέκυψε από την εκχύλιση μετατρέπεται σε βιοντίζελ (biodiesel). Στα κεφάλαια που ακολουθούν παρουσιάζονται αναλυτικότερες πληροφορίες για τα διάφορα στάδια, καθώς και οι εισροές και οι εκροές του κάθε ενός εξ' αυτών. Είναι σημαντικό όμως να κατανοήσουμε τα όρια του συστήματος, τα οποία εξετάζονται στην συγκεκριμένη εργασία. Συγκεκριμένα, αναλύουμε τα στάδια από την καλλιέργεια της άλγης, μέχρι την μετατροπή της σε βιοντίζελ. Αυτό συνεπάγεται ότι δεν ερευνούμε την διαδικασία μεταμόσχευσης της άλγης μέσα στην δεξαμενή, αλλά ούτε την περεταίρω χρήση του παραγόμενου βιοντίζελ. Επίσης δεν εξετάζουμε τις κατασκευαστικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις κάποιων μηχανημάτων που χρησιμοποιούνται στην παραγωγή, όπως για παράδειγμα της συσκευής εκχύλισης και της συσκευής ξήρανσης, καθώς είναι εξαιρετικά δύσκολη η διερεύνηση τους, εφόσον δεν γνωρίζουμε όλα τα κατασκευαστικά τους στοιχεία. Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζονται τα στάδια του κύκλου ζωής του βιοντίζελ.



Διάγραμμα 1: Κύκλος Ζωής Βιοντίζελ.

2.4.1 Καλλιέργεια Άλγης

Η καλλιέργεια αποτελεί το πρωταρχικό και το πιο σημαντικό στάδιο όλης της διαδικασίας, καθώς από αυτήν εξαρτάται η ποσότητα του παραγόμενου βιοντίζελ. Τρία βασικά χαρακτηριστικά της καλλιέργειας είναι:

- Η επιλογή του είδους της άλγης. Συγκεκριμένα με διαφορετικά είδη μπορούν να επιτευχθούν διαφορετικές ποσότητες βιοντίζελ. Αυτό συμβαίνει, καθώς κάθε είδος άλγης διαθέτει διαφορετικό ποσοστό λιπιδίων κατά βάρος.

- Η επιλογή του τύπου της καλλιέργειας της άλγης. Όπως αναφέραμε και προηγουμένως τα κλειστά συστήματα παραγωγής έχουν μεγαλύτερη απόδοση σε σχέση με τα ανοιχτά, αλλά παρουσιάζουν διαφορετικού είδους προβλήματα κατά την λειτουργία τους.
- Ο προσδιορισμός της ποιότητας και της ποσότητας των απαιτούμενων λιπασμάτων, ο οποίος καθορίζει την παραγωγικότητα που θα επιτευχθεί.

Στο μοντέλο μας διερευνήθηκαν τέσσερα διαφορετικά σενάρια:

1. Καλλιέργεια του είδους *Spirulina Platensis* σε ανοιχτή δεξαμενή.
2. Καλλιέργεια του είδους *Nannochloropsis* sp. σε ανοιχτή δεξαμενή.
3. Καλλιέργεια του είδους *Spirulina Platensis* σε κλειστή δεξαμενή.
4. Καλλιέργεια του είδους *Nannochloropsis* sp. σε κλειστή δεξαμενή.

Καθένα από τα παραπάνω σενάρια παρουσιάζει ορισμένες διαφοροποιήσεις, τις οποίες θα παραθέσουμε αργότερα. Στον παρακάτω Πίνακα παρουσιάζονται οι βασικές εισροές και εκροές για το στάδιο της καλλιέργειας και για τα τέσσερα σενάρια.

Πίνακας 5: Εισροές και Εκροές για το στάδιο της καλλιέργειας.

Εισροές	Εκροές
Νερό	Άλγη
Χρήση Γης	
Λιπάσματα	
Ενέργεια Φωτοσύνθεσης/Φως	
Ενέργεια για ανάδευση	
Κατασκευαστικά υλικά	
CO ₂	

2.4.2 Συγκομιδή και Ξήρανση Άλγης

Όπως γίνεται αντιληπτό από τους πίνακες παραγωγικότητας (βλέπε σελ. 16, 18), οι συγκεντρώσεις βιομάζας που έχουν παρατηρηθεί στις καλλιέργειες άλγης δεν ξεπερνούν τα τρία γραμμάρια ανά λίτρο, κάτι το οποίο υποδηλώνει ότι για να καταφέρουμε να ανακτήσουμε μερικά γραμμάρια ξηρής βιομάζας άλγης, πρέπει να απομακρύνουμε σχεδόν ένα λίτρο νερό από την άλγη. Προκειμένου να φτάσουμε στην επίτευξη του επιθυμητού διαχωρισμού στερεής-υγρής φάσης, είναι απαραίτητη η εφαρμογή μιας κατάλληλης μεθόδου, η οποία θα περιλαμβάνει ένα ή περισσότερα στάδια διαφόρων φυσικών, χημικών ή βιολογικών μεθόδων. Οι διεργασίες αυτές είναι εξαιρετικά ενεργοβόρες και επηρεάζουν άμεσα την βιωσιμότητα της καλλιέργειας άλγης.

Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την συγκομιδή και ξήρανση των μικροφυκών (άλγη), βασίζονται στον διαχωρισμό με βάση το μέγεθος ή την πυκνότητα. Οι πιο διαδεδομένες τεχνικές τέτοιου είδους είναι :

- Η διήθηση,
- Η καθίζηση,
- Η φυγοκέντρωση,
- Η επίπλευση,
- Η κροκίδωση.

Στη συνέχεια η συγκεντρωμένη βιομάζα οδηγείται για ξήρανση μέσω διαφόρων μεθόδων (θερμική ξήρανση, φυγόκεντρος κοχλίας ξήρανσης), με σκοπό την επίτευξη των επιθυμητών ποσοστών υγρασίας.

Στο μοντέλο που εξετάζουμε, ως μέθοδος συγκομιδής και ξήρανσης έχει επιλεγθεί μία νέα σχετικά τεχνολογική ανακάλυψη, η οποία συνδυάζει τις παραπάνω διαδικασίες. Το διάλυμα άλγης-νερού διοχετεύεται μέσω μιας βοηθητικής δεξαμενής σε έναν ταινιόδρομο, ο οποίος λόγω της ειδικής μεμβράνης που διαθέτει επιτρέπει μόνο στα μόρια του νερού να διαπεράσουν μέσα από αυτήν. Αυτό συμβαίνει, καθώς τα μόρια του νερού είναι πολύ μικρότερα σε σχέση με τα μόρια της άλγης ($1/33000$). Με αυτήν τη διαδικασία βαρυτικής διήθησης, σε πρώτο στάδιο τα μικροφύκη διαχωρίζονται από το νερό και στην συνέχεια ξηραίνονται με την βοήθεια ειδικών θερμικών λαμπτήρων, οι οποίοι βρίσκονται

πάνω από τον ταινιόδρομο. Η ξηρή βιομάζα άλγης που προκύπτει συλλέγεται στο τέλος του διαδρόμου και από εκεί οδηγείται σε ένα σιλό αποθήκευσης. Η αποθήκευση της πρέπει να γίνεται σε κλειστό μέσο, διότι αποτελεί ιδιαίτερα πτητικό στοιχείο. Το νερό που προκύπτει οδηγείται πίσω στις δεξαμενές καλλιέργειας με μία αντλία, αφού πρώτα συγκεντρωθεί σε μία δεξαμενή τριάντα κυβικών.

Πρέπει να τονιστεί ότι η συστηματική (καθημερινή) συγκομιδή της παραγωγής ξεκινάει μετά από τη συγκέντρωση μιας ελάχιστης κρίσιμης ποσότητας βιομάζας ανά λίτρο διαλύματος, εντός των δεξαμενών. Η προϋπόθεση αυτή ισχύει ανεξάρτητα από το είδος της καλλιεργούμενης άλγης και τον τύπο της δεξαμενής. Στις περιπτώσεις μας η αρχική ποσότητα συσσωρευμένης βιομάζας είναι :

1. Καλλιέργεια του είδους *Spirulina Platensis* σε ανοιχτή δεξαμενή :
0,6405 g/L/D
2. Καλλιέργεια του είδους *Nannochloropsis* sp. σε ανοιχτή δεξαμενή :
0,315 g/L/D
3. Καλλιέργεια του είδους *Spirulina Platensis* σε κλειστή δεξαμενή :
0,6405 g/L/D
4. Καλλιέργεια του είδους *Nannochloropsis* sp. σε κλειστή δεξαμενή :
0,315 g/L/D

Πίνακας 6: Εισροές και Εκροές για το στάδιο της Συγκομιδής και Ξήρανσης.

Εισροές	Εκροές
Άλγη	Ξηρή βιομάζα Άλγης
Ενέργεια λειτουργίας	Νερό

2.4.3 Εκχύλιση Ξηρής Βιομάζας Άλγης μέσω Soxhlet

Αφού λοιπόν γίνει η συλλογή της ξηρής βιομάζας της άλγης περνάμε στο επόμενο στάδιο, κατά το οποίο πρέπει να γίνει η εξαγωγή των λιπιδίων από την βιομάζα, εφόσον το επιθυμητό προϊόν είναι το λάδι στην περίπτωση μας. Κάτι τέτοιο μπορεί να πραγματοποιηθεί με κάποια από τις παρακάτω τεχνικές :

Μηχανικές μέθοδοι :

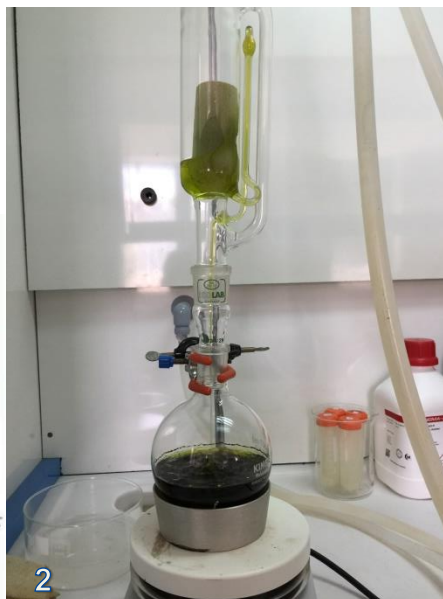
1. Σύνθλιψη μέσω ειδικών συσκευών (Expeller press)
2. Εξαγωγή με την βοήθεια Υπερήχων (Ultrasonic-assisted extraction)

Χημικές μέθοδοι :

3. Εξαγωγή με οργανικό διαλύτη (Solvent extraction)
4. Εξαγωγή με υπερκρίσιμο ρευστό (Supercritical fluid extraction)

Στο μοντέλο που εξετάζεται χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος εξαγωγής με οργανικό διαλύτη και συγκεκριμένα με διάταξη Soxhlet. Ως οργανικός διαλύτης χρησιμοποιήθηκε το εξάνιο, το οποίο είναι το πιο διαδεδομένο για εκχύλιση μικροφυκών. Υπάρχουν βέβαια και διάφοροι άλλοι διαλύτες όπως είναι η μεθανόλη, η αιθανόλη και το χλωροφόρμιο οι οποίοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν έναντι του εξανίου. Επίσης είναι δυνατή και η ανάμειξη ορισμένων εξ' αυτών, σε διαφορές αναλογίες μεταξύ τους.

Κατά την διεργασία αυτή, το εξάνιο θερμαίνεται μέσα στην δεξαμενή μιας εργοστασιακής διάταξης Soxhlet, έως ότου να φτάσει περίπου τους 70°C. Στην συνέχεια, υγροποιείται και έρχεται σε επαφή με τα μικροφύκη. Ο οργανικός διαλύτης, στην περίπτωση μας το εξάνιο, διασπά τα κύτταρα της άλγης και δεσμεύει τα λιπίδια. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται αρκετές φορές έτσι ώστε να εξαχθούν όσο το δυνατόν περισσότερα λιπίδια. Στην συνέχεια το λάδι από τα μικροφύκη διαχωρίζεται από το εξάνιο μέσω διαδικασίας εξάτμισης. Κατά την ολοκλήρωση μιας τέτοιας πλήρους διεργασίας, οι απώλειες του εξανίου κυμαίνονται γύρω στο 5%. Η βιομάζα που απομένει οδηγείται για χρήση ως pellet.



Εικόνα 1 : Εργοστασιακό Soxhlet

Εικόνα 2 : Πειραματική διάταξη εργαστηριακής εκχύλιση άλγης με σκοπό την κατανόηση της διαδικασίας

Πίνακας 7: Εισροές και Εκροές για το στάδιο της εκχύλισης.

Εισροές	Εκροές
Ξηρή βιομάζα άλγης	Λάδι
Ενέργεια Λειτουργίας	Pellet

2.4.4 Μετατροπή Ελαίου Άλγης σε Βιοντίζελ

Στο τελικό αυτό στάδιο το λάδι οδηγείται σε μια αυτόνομη εργοστασιακή μονάδα παραγωγής βιοντίζελ, η οποία βρίσκεται εντός των εγκαταστάσεων. Σε αυτήν, το λάδι μέσω της αλκαλικής μετεστεροποίησης που περιγράψαμε νωρίτερα, μετατρέπεται σε βιοντίζελ και γλυκερίνη (παραπροϊόν). Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται με τη χρήση μεθανόλης και του υδροξειδίου του καλίου ως καταλύτη. Αφού πρώτα γίνει διαχωρισμός του μίγματος προστίθεται απιονισμένο νερό, με σκοπό την εξευγένιση του βιοντίζελ μέσω διεργασιών πλύσης. Η μετατροπή του ελαίου σε βιοντίζελ μπορεί να φτάσει σε ποσοστά 98 %.

Πίνακας 8: Εισροές και Εκροές για το στάδιο της μετατροπής ελαίου σε βιοντίζελ.

Εισροές	Εκροές
Λάδι άλγης	Βιοντίζελ
Ενέργεια Λειτουργίας	Γλυκερίνη
Απιονισμένο Νερό	Νερό



Εικόνα 1 : Πειραματική διάταξη εργαστηριακής παραγωγής βιοντίζελ από έλαιο άλγης

2.5 Διεθνής Επιστημονική Εμπειρία

Η καλλιέργεια άλγης με σκοπό την τη παραγωγή βιοντίζελ αποτελεί μία σχετικά νέα διαδικασία. Συνεπώς η διεθνής εμπειρία όσο αναφορά τις μελέτες ανάλυσης κύκλου ζωής παρόμοιων διεργασιών είναι σχετικά περιορισμένη. Οι διαθέσιμες έρευνες που υπάρχουν στην βιβλιογραφία παρουσιάζουν αρκετά κοινά αποτελέσματα αν και υπάρχουν βέβαια διαφοροποιήσεις μεταξύ τους, κυρίως λόγω των διαφορετικών ειδών καλλιέργειας και μεθόδων επεξεργασίας που εξετάζονται.

Οι Laurent Lardon και Arnaud Helias σε μελέτη που πραγματοποιήθηκε το 2009, εξέτασαν μια ενδεχόμενη παραγωγή βιοντίζελ από έλαιο άλγης και συγκεκριμένα το είδος *Chlorella Vulgaris*. Κατέληξαν λοιπόν στο συμπέρασμα ότι η συγκεκριμένη διαδικασία πάσχει από αρκετά μειονεκτήματα με τις παρούσες τεχνολογικές συνθήκες. Αυτό συμβαίνει, καθώς τα στάδια καλλιέργειας, συγκομιδής και ξήρανσης έχουν μεγάλες ενεργειακές απαιτήσεις και οδηγούν σε ένα αρνητικό ενεργειακό ισοζύγιο, δηλαδή σε αρνητικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις [Laurent και Helias, 2009].

Αργότερα οι Kyle Sander και Ganti S. Murthy πραγματοποίησαν ανάλυση κύκλου ζωής, βασισμένοι σε διάφορα λειτουργικά στοιχεία από προγενέστερες μελέτες σχετικά με την καλλιέργεια άλγης. Σύγκριναν λοιπόν δύο διαδικασίες καλλιέργειας μεταξύ τους. Στην πρώτη χρησιμοποιήθηκαν πρέσες, με σκοπό την αφυδάτωση κατά το στάδιο της συγκομιδής, ενώ στην δεύτερη πραγματοποιήθηκε φυγοκέντρωση. Κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι και οι δύο περιπτώσεις έχουν υπερβολικές ενεργειακές απαιτήσεις, αν και η δεύτερη διαδικασία είχε μόλις τις μισές σε σχέση με την πρώτη. Τόνισαν τη σημασία εύρεσης νέων, ενεργειακά οικονομικότερων μεθόδων συγκομιδής και υποστήριξαν ότι μια πιθανή απαλοιφή του ενδιάμεσου σταδίου αφυδάτωσης θα μπορούσε να καταστήσει την όλη διεργασία βιώσιμη [Sander et al., 2010].

Ο H.H. Khou στην έρευνα του πραγματοποίησαν σύγκριση για την βιωσιμότητα μεταξύ των δύο βασικότερων τεχνικών καλλιέργειας, δηλαδή των κλειστών φωτοβιοαντιδραστήρων και των ανοιχτών τεχνητών καναλιών. Η μελέτη έδειξε ότι οι καλλιέργειες σε φωτοβιοαντιδραστήρες (PRB) είναι ποιο ενεργοβόρες σε σχέση με τις ανοιχτές καλλιέργειες (Raceway Ponds) σε ποσοστά που

ξεπερνάνε το 100%. Επιπλέον σύμφωνα με τα αποτελέσματα του, το 85% των συνολικών ενεργειακών απαιτήσεων για παραγωγή βιοντίζελ προέρχεται από το στάδιο της εκχύλισης των λιπιδίων, ενώ μόνο το 2% από το στάδιο της μετατροπής του ελαίου σε βιοντίζελ. Συμπερασματικά, το κύριο εμπόδιο στην βιώσιμη παραγωγή βιοντίζελ από άλγη είναι το πολύ μεγάλο ποσό ενέργειας που απαιτεί το στάδιο της εκχύλισης (Lipid Extraction) [Khou, 2011].

Την ίδια χρονιά ο Anoop Singh στην μελέτη του με όνομα «Κριτική ανασκόπηση της βιοχημικής μετατροπής, της βιωσιμότητας και της ανάλυσης κύκλου ζωής» κατέληξε και αυτός με τη σειρά του στο συμπέρασμα της αναγκαιότητας εξέλιξης των μεθόδων παραγωγής, συγκομιδής και εκχύλισης των μικροφυκών, με σκοπό στο μέλλον το βιοντίζελ από βιομάζα άλγης να διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στα ενεργειακά συστήματα [Singh et al, 2011].

Σε μια πιο πρόσφατη έρευνα οι Howard Passella και Harnoor Dhaliwalb, πραγματοποίησαν ανάλυση κύκλου ζωής για δύο διαφορετικά σενάρια. Στο πρώτο σενάριο καλλιεργήθηκε το είδος *Nannochloropsis* sp. σε ανοιχτές δεξαμενές τεχνητών καναλιών συνολικής διάστασης χιλίων τετραγωνικών μέτρων (1.000 m^2). Στο εναλλακτικό σενάριο έγινε μια υποθετική μελέτη για μια μελλοντική επεκταμένη μορφή της καλλιέργειας, σε αναλογία 1:100, δηλαδή συνολικού εμβαδού εκατό χιλιάδων τετραγωνικών μέτρων (100.000 m^2). Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το μελλοντικό μοντέλο οδήγησε στην μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων σε διάφορες κατηγορίες (Εκπομπές NO_x , εκπομπές SO_x , σχηματισμό φωτοχημικού όζοντος, κατανάλωση νερού). Παρόλα αυτά οι επιπτώσεις από τις ενεργειακές απαιτήσεις της διαδικασίας παραμένουν. Τα αποτελέσματα των περιβαλλοντικών επιπτώσεων είναι και στις δύο περιπτώσεις υψηλότερα σε σχέση με την παραγωγή βιοντίζελ από σόγια, αλλά ακόμα και σε σχέση με το κοινό ντίζελ. Αυτό οφείλεται κατά κύριο λόγο, στην υψηλή κατανάλωση ενέργειας στα στάδια της συγκομιδής και της καλλιέργειας των μικροφυκών [Passella και Dhaliwalb, 2013].

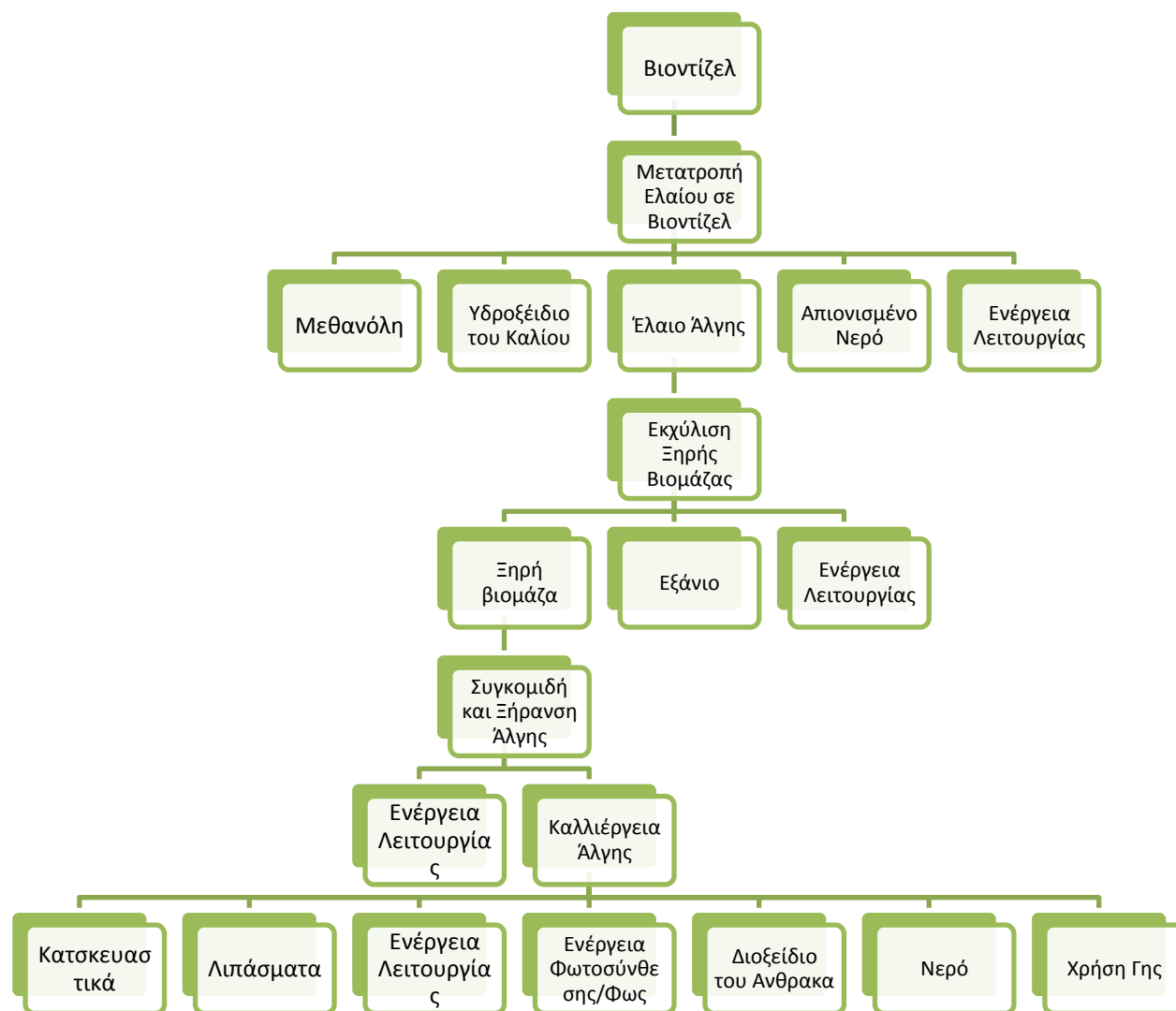
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΤΑΔΙΩΝ ΚΥΚΛΟΥ ΖΩΗΣ

3.1 Σκοπός

Σκοπός αυτής της ανάλυσης είναι η ποσοτικοποίηση των τεσσάρων εναλλακτικών καλλιεργειών, με τη δημιουργία των απαραίτητων ισοζυγίων για κάθε στάδιο. Τα νούμερα που υπολογίστηκαν τοποθετήθηκαν στο λογισμικό *SimaPro7*, για να προκύψουν τα αποτελέσματα των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των τεσσάρων διεργασιών αλλά και κάθε σταδίου ξεχωριστά. Στο διάγραμμα που ακολουθεί, απεικονίζεται ολόκληρη η διαδικασία με τα προαπαιτούμενα στοιχεία για το κάθε στάδιο. Η διαδικασία αυτή ακολουθείται και στα τα τέσσερα σενάρια, ενώ διαφοροποιήσεις μεταξύ των σεναρίων εμφανίζονται μονάχα σε επιμέρους στοιχεία ορισμένων σταδίων.

Τα σενάρια είναι τα εξής:

- Καλλιέργεια του είδους *Spirulina Platensis* σε ανοιχτή δεξαμενή.
- Καλλιέργεια του είδους *Nannochloropsis* sp. σε ανοιχτή δεξαμενή.
- Καλλιέργεια του είδους *Spirulina Platensis* σε κλειστή δεξαμενή.
- Καλλιέργεια του είδους *Nannochloropsis* sp. σε κλειστή δεξαμενή.



Διάγραμμα 2: Αναλυτικός κύκλος ζωής βιοντίζελ από άλγη.

3.2 Ανάλυση Κύκλου Ζωής Καλλιέργειας του Είδους *Spirulina Platensis* σε Ανοιχτή Δεξαμενή

3.2.1 Στάδιο Καλλιέργειας

Πίνακας 9: Χαρακτηριστικά για το είδος *Spirulina Platensis*.

Είδος άλγης	Παραγωγικότητα (g/L/d)	Ποσοστό Λιπιδίων
<i>Spirulina Platensis</i>	0,183	11 %

Στο στάδιο αυτό εντάξαμε και ορισμένα απαραίτητα στοιχεία τα οποία προέχουν σε σχέση με την έναρξη λειτουργίας της καλλιέργειας. Τα δύο αυτά προαπαιτούμενα είναι :

1. Χρήση Γης

Όπως είναι λογικό, προκειμένου να γίνει η εγκατάσταση, απαιτείται η δέσμευση μιας περιοχής. Στην δικιά μας περίπτωση, η έκταση αυτή αναλογεί στο ενάμισι εκτάριο (15.000 m²). Από τα οποία, μόνο το ένα χρησιμοποιείται για καλλιέργεια και στο άλλο μισό κατασκευάστηκε ένα κτίριο το οποίο στεγάζει τις υπόλοιπες διεργασίες. Συνεπώς, τα αποτελέσματά μας βασίστηκαν σε αναλογία ενός εκταρίου. Το πλεονέκτημα των άλγεων είναι ότι δεν απαιτούν καλλιεργήσιμη γη για την εγκατάστασή τους, έτσι λοιπόν η μονάδα τοποθετήθηκε σε ανεκμετάλλευτη γη.

2. Κατασκευαστικά

Για την κατασκευή της εγκατάστασης χρησιμοποιήθηκαν τα παρακάτω υλικά :

- Είκοσι τόνοι (20 t) σίδηρο για την δημιουργία ενός προκατασκευασμένου κτιρίου, το οποίο στεγάζει τις περισσότερες διεργασίες.
- Για την κατασκευή δέκα δεξαμενών χρειάστηκαν συνολικά 787 m³ μπετόν. Κάθε δεξαμενή καλύπτει μια έκταση 666 m² και οι επιμέρους διαστάσεις της είναι: 111

η μήκος, 6 m πλάτος και 0,5 m ύψος. Τα πλαϊνά τοιχώματα καθώς και ο πάτος των δεξαμενών έχουν πάχος 0,1 m.

- Επιπλέον, για οπλισμό του σκυροδέματος, σε κάθε μία από αυτές τις δεξαμενές, χρησιμοποιήθηκαν 1.489 kg σίδερο, εκ των οποίων τα 670 kg τοποθετήθηκαν στους πάτους και τα υπόλοιπα 819 kg στα πλαϊνά τοιχώματα. Συνεπώς για όλη την εγκατάσταση χρειάστηκαν 14.890 kg σίδερο.
- Με σκοπό την αποφυγή διαρροών, στεγανοποιήθηκαν όλα τα τοιχώματα των δεξαμενών με ειδικό χρώμα. Δαπανήθηκαν για το σκοπό αυτό 7.836 kg στεγανωτικού, δηλαδή 1 kg/m^2 .
- Για τις συνδέσεις μεταξύ της καλλιέργειας και της συγκομιδής χρησιμοποιήθηκαν περίπου 2,5 km σωλήνων υψηλής πυκνότητας πολυαιθυλενίου (HDPE), διαμέτρου 110 mm και βάρους 1,43 kg/m. Συμπερασματικά, σύμφωνα με τους υπολογισμούς το συνολικό τους βάρος κυμαίνεται στα 3.575 kg [www.technoroi.com].
- Επίσης εγκαταστάθηκαν δύο δεξαμενές χαμηλής πυκνότητας πολυαιθυλενίου (LDPE) όγκου 5 m^3 και 30 m^3 , πριν και μετά την διαδικασία συγκομιδής-ξήρανσης αντίστοιχα. Οι δεξαμενές αυτές λειτουργούν σαν ενδιάμεσοι σταθμοί συγκέντρωσης και τροφοδότησης. Το συνολικό τους βάρος είναι 600 kg, καθώς σύμφωνα με τα τεχνικά χαρακτηριστικά τους ζυγίζουν 20 kg/m^3 [www.rotosal.gr].
- Ένα σιλό από fiberglass δέκα κυβικών εκατοστών και βάρους 345 kg, τοποθετήθηκε πριν τη διαδικασία της εκχύλισης για την συλλογή της ξηρής βιομάζας [www.koutsikos.com].
- Τέλος, στο στάδιο της εκχύλισης τα δοχεία βρασμού των διατάξεων Soxhlet, μονώθηκαν με πάνελ πολυουρεθάνης πάχους 20 cm. Στόχος της μόνωσης αυτής είναι η μείωση των θερμικών απωλειών κατά την διαδικασία. Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκαν $0,954 \text{ m}^3$ πολυουρεθάνης για δοχείο βρασμού όγκου 500 L.

Ως διάστημα χρόνου μελετάται ο ένας χρόνος, δηλαδή 360 μέρες. Για τα κατασκευαστικά όμως στοιχεία ως χρόνος ζωής θεωρούνται τα 40 έτη. Στη συνέχεια ακολουθούν τα υπόλοιπα απαραίτητα στοιχεία για το στάδιο της καλλιέργειας.

3. Νερό

Το συγκεκριμένο είδος άλγης (*Spirulina Platensis*) ευδοκιμεί σε γλυκά νερά. Θα χρειαστούμε λοιπόν 2.000 m³ γλυκού νερού και για τις δέκα δεξαμενές, καθώς σε κάθε δεξαμενή τοποθετούνται 200 m³ νερό. Από αυτά τα 2.000 m³ νερού που χρησιμοποιούνται σε καθημερινή βάση, τα 250 m³ οδηγούνται για συγκομιδή και στην συνέχεια αφού διαχωριστούν από την άλγη επιστρέφουν ξανά μέσα στην δεξαμενή.

Πραγματοποιώντας τους κατάλληλους υπολογισμούς προκύπτει το συμπέρασμα ότι σε κάθε δεξαμενή το ύψος του μίγματος ανέρχεται μόνο στα 30 cm. Σύμφωνα με έρευνες τα επιθυμητά όρια για το βάθος καλλιέργειας άλγης κυμαίνονται ανάμεσα στα 15 cm και 40 cm [Becker, 1994, Chen et.al, 2009]. Ο λόγος για τον οποίο τα όρια αυτά είναι μικρά συνδέεται με το γεγονός ότι το φως εξασθενεί όσο αυξάνεται το βάθος και συνεπώς η δυνατότητα φωτοσύνθεσης της άλγης ελαχιστοποιείται.

$$\text{Βάθος Δεξαμενής} = \frac{\text{Όγκος Δεξαμενής}}{\text{Επιφάνεια Δεξαμενής}} = \frac{200\text{m}^3}{666\text{m}^2} = 0,30 \text{ m} \quad (\text{Εξίσωση 3.2.1.1})$$

Στις ανοιχτές όμως αυτές καλλιέργειες οι κλιματολογικές συνθήκες παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα οι υψηλές θερμοκρασίες να προκαλούν εξάτμιση του νερού που βρίσκεται στις δεξαμενές. Έπειτα από υπολογισμούς καταλήξαμε στο συμπέρασμα ότι η μεσοσταθμική ημερήσια εξάτμιση του νερού κυμαίνεται γύρω στο 1%. Άρα η ετήσια απαιτούμενη ποσότητα νερού προς αναπλήρωση είναι 7.200 m³. Δηλαδή συνολικά δεσμεύθηκαν 9.200 m³ γλυκού νερού.

4. Ενέργεια Λειτουργίας

Η ενέργεια λειτουργίας αναφέρεται στην κίνηση της φτερωτής (paddlewheel), η οποία βρίσκεται εντός των δεξαμενών. Σκοπός της είναι η συνεχής ανάδευση και κυκλοφορία του μίγματος για αποφυγή ενδεχόμενης καθίζησης της άλγης. Η ταχύτητα ανάδευσης είναι 15 cm/s, δηλαδή πάνω από το

ελάχιστο επιτρεπόμενο όριο των 10 cm/s [Shen et al., 2009]. Οι φτερωτές αυτές λειτουργούν σε όλη τη διάρκεια του εικοσιτετραώρου και κάθε μία τροφοδοτείται μέσω ενός ηλεκτρικού μοτέρ ισχύος 1 kW. Οι ετήσιες ενεργειακές τους απαιτήσεις άρα ανέρχονται στις 86.400 kWh/έτος [Becker, 1994].

5. Ενέργεια Φωτοσύνθεσης – Φως

Όπως αναφέραμε και προηγουμένως, η ενέργεια αυτή είναι ο σημαντικότερος παράγοντας της φωτοσύνθεσης. Στην περίπτωση των ανοιχτών συστημάτων καλλιέργειας που συναντάμε σε αυτό το σενάριο η ενέργεια αυτή προέρχεται από τον ήλιο, συνεπώς εκμεταλλευόμαστε μία φυσική πηγή ενέργειας.

6. Διοξείδιο του άνθρακα (CO₂)

Σύμφωνα με μελέτες η άλγη για να αναπαραχθεί δεσμεύει μεγάλες ποσότητες διοξειδίου του άνθρακα. Συγκεκριμένα για την παραγωγή ενός κιλού ξηρής βιομάζας άλγης απαιτούνται 1,83 kg CO₂ [Chisti, 2007]. Για το σενάριο αυτό λοιπόν δεσμευτήκαν 120.561 kg CO₂ σε ετήσια βάση, καθώς όπως θα δούμε παρακάτω η ποσότητα ξηρής βιομάζας άλγης που συλλέχτηκε είναι 65.880 kg σε διάστημα ενός χρόνου.

7. Λιπάσματα (Nutrients)

Όπως γίνεται αντιληπτό τα λιπάσματα παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο στην παραγωγικότητα της άλγης και συνεπώς οι μελέτες γύρω από αυτό το θέμα ποικίλουν. Βασιζόμενοι λοιπόν στην μελέτη του FAO θεωρήσαμε ότι η απαραίτητη συγκέντρωση λιπάσματος στις δεξαμενές είναι 14 mg/L. Η αναλογία που προτείνεται συγκεκριμένα είναι 16/20/20 για N/P/K αντίστοιχα [www.fao.org]. Λόγω δυσκολίας εύρεσης του αντίστοιχου λιπάσματος επιλέξαμε ένα παρόμοιο αναλογίας 20/20/20.

Εφόσον λοιπόν επεξεργαζόμαστε καθημερινά 250 m^3 μίγματος τα λιπάσματα που πρέπει να αναπληρωθούν αντιστοιχούν σε αυτήν την ποσότητα. Δηλαδή :

$$250.000 \text{ l} * 0,000014 \text{ kg} = 3,5 \text{ kg} \quad (\text{Εξίσωση 3.2.1.2})$$

Άρα σε ετήσια βάση καταναλώθηκαν 1.260 kg λιπασμάτων. Συγκεκριμένα με βάση την παραπάνω αναλογία χρησιμοποιήθηκαν 252 kg αζώτου, φωσφόρου και καλίου.

3.2.2 Στάδιο Συγκομιδής και Ξήρανσης

Στο στάδιο αυτό απαιτήθηκαν 42 ταινιόδρομοι των χαρακτηριστικών που αναφέραμε στο κεφάλαιο 2.4.2. Κάθε ένας από αυτούς έχει δυνατότητα επεξεργασίας 500 L/h . Αν λάβουμε υπόψη μας ότι καθημερινά επεξεργαζόμαστε 250 m^3 , γίνεται αντιληπτό ότι οι ταινιόδρομοι θα πρέπει να λειτουργούν 12 ώρες την ημέρα.

$$\frac{250000 \text{ l}}{500 \frac{\text{l}}{\text{h}} * 42} = 11,9 \approx 12 \text{ h} \quad (\text{Εξίσωση 3.2.2.1})$$

Για αυτό το πρώτο σενάριο οι υπολογισμοί για την αναμενόμενη καθημερινή παραγωγή ξηρής βιομάζας γίνονται με τη μισή τιμή παραγωγικότητας σε σχέση με αυτήν που προαναφέρθηκε, δηλαδή $0,0915 \text{ g/L/d}$. Αυτό συμβαίνει για λόγους διασφάλισης της καθημερινότητας στην συγκομιδή. Όπως γίνεται κατανοητό τα 250 m^3 νερού που επιστρέφουν καθημερινά στις δεξαμενές πρέπει να αναπληρωθούν με βιομάζα προτού μπορέσουν να αφαιρεθούν εκ νέου. Πιο συγκεκριμένα :

$$2.000.000 \text{ l} * 0,183 \frac{\text{g}}{\text{l} * \text{d}} =$$

$$= 366 \frac{\text{kg}}{\text{d}} \quad \text{Θεωρητική ημερήσια παραγωγή ξηρής βιομάζας} \quad (\text{Εξίσωση 3.2.2.2})$$

$$250.000 \text{ l} * 0,0915 \frac{\text{g}}{\text{l} * \text{d}} + 0,6405 \frac{\text{g}}{\text{l} * \text{d}} =$$

$$= 183 \frac{\text{kg}}{\text{d}} \quad \text{Αναμενόμενη ημερήσια ποσότητα συγκομιδής} \quad (\text{Εξίσωση 3.2.2.3})$$

$$2.000.000 \text{ l} * 0,0915 \frac{\text{g}}{\text{l} * \text{d}} =$$

$$183 \frac{\text{kg}}{\text{d}} \text{ Πραγματική παραγωγή ξηρής βιομάζας (Εξίσωση 3.2.2.4)}$$

Όπως φαίνεται η ποσότητα που παραμένει στην δεξαμενή υπερκαλύπτει την ποσότητα που αντλείται καθημερινά και επιτρέπει την βιωσιμότητα του έργου. Άρα τελικά η συνολική ετήσια παραγωγή ανέρχεται στα 65.880 kg/έτος.

- Ενέργεια Λειτουργίας

Για την λειτουργία ενός ταινιόδρομου για χρονικό διάστημα δώδεκα ωρών απαιτούνται 480 Wh (40 x 12 =480). Αν συμπεριλάβουμε και τα 42 μηχανήματα σε διάστημα ενός χρόνου, η κατανάλωση φτάνει τις 7.258 kWh/έτος. Το ποσό αυτό όμως αντιπροσωπεύει μόνο την ενέργεια κίνησης του μηχανήματος. Οι τρεις λάμπες ξήρανσης (3 x 100=300 W) που βρίσκονται στο τέλος κάθε ταινιόδρομου καταναλώνουν συνολικά επιπλέον 54.432 kWh/έτος.

3.2.3 Στάδιο Εκχύλισης της Ξηρής Βιομάζας

Η ξηρή βιομάζα άλγης συλλέγεται καθημερινά σε κιβώτια που βρίσκονται στο τέλος των ταινιόδρομων και από εκεί τοποθετείται σε έναν κλειστό κοχλία μεταφοράς, ο οποίος την οδηγεί σε ένα σιλό αποθήκευσης κατασκευασμένο από fiberglass. Αυτό συμβαίνει για αποφυγή απώλειας της ξηρής βιομάζας άλγης, καθώς είναι ιδιαίτερα πτητική. Στην συνέχεια διοχετεύεται εντός του δοχείου της διάταξης Soxhlet.

Η απαραίτητη ετήσια ποσότητα εξανίου για την λειτουργία του Soxhlet με βάση τις απώλειες του συστήματος (5% ημερησίως) ανέρχεται στα 3.294 kg. Η αναλογία εξανίου-ξηρής βιομάζας πριν την έναρξη της εκχύλισης πρέπει να είναι καθημερινά 1:1 [Alves da Cruz, 2012].

Όπως αναφέραμε το δοχείο θέρμανσης του Soxhlet είναι ειδικά μονωμένο, συνεπώς το μεγαλύτερο ποσό ενέργειας απαιτείται κατά την αρχική θέρμανση του εξανίου (C_6H_{14}), μέχρι αυτό να φτάσει την επιθυμητή θερμοκρασία. Στο

συγκεκριμένο σενάριο χρησιμοποιείται ένα μόνο μηχάνημα χωρητικότητας πεντακοσίων λίτρων με συνολική κατανάλωση 12.899 kWh/έτος.

Υπολογισμός απαιτούμενης ενέργειας για αρχική θέρμανση του εξανίου :

$$Q = n * C * \Delta T = \frac{183.000 \text{ gr}}{86,178 \frac{\text{gr}}{\text{mol}}} * 197,66 \frac{\text{J}}{\text{mol} * \text{K}} * 50 \text{ K} = 20.986.667,1 \text{ Joule}$$

$$= 20.986,67 \text{ J} = 5,83 \text{ kWh} \quad (\text{Εξίσωση 3.2.3.1})$$

Όπου: $n = M / M_r$

C:Ειδική Θερμότητα

ΔT : Διαφορά θερμοκρασίας

Στην παραπάνω ενέργεια προσθέσαμε 2 kWh για διατήρηση της θερμοκρασίας στους 70 °C για τις 8 h λειτουργίας του Soxhlet σε καθημερινή βάση. Τέλος σύμφωνα με τον κατασκευαστή το μηχάνημα καταναλώνει άλλα 3,5 kW/h για τις υπόλοιπες λειτουργίες του.

$$(5,83 \text{ kWh} + 2 \text{ kWh} + 3,5 \text{ kW} * 8 \text{ h}) * 360 \text{ d} = 12.898,8 \frac{\text{kWh}}{\text{Year}} \quad (\text{Εξίσωση 3.2.3.2})$$

Το λάδι που προκύπτει από την παραπάνω διαδικασία ανέρχεται στα 7.247 kg τον χρόνο, καθώς το ποσοστό λιπιδίων του συγκεκριμένου είδους άλγης δεν ξεπερνά το 11 – 12%.

$$65.880 \text{ kg} * 0,11 = 7.246,7 \text{ kg} \quad (\text{Εξίσωση 3.2.3.3})$$

Η βιομάζα άρα που απομένει από αυτήν την διαδικασία και οδηγείται για χρήση ως pellet είναι 58.633 kg.

3.2.4 Στάδιο Μετατροπής Ελαίου Άλγης σε Βιοντίζελ

Οι αναλογίες των στοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτό το στάδιο είναι όμοιες και για τα τέσσερα σενάρια που εξετάζονται στην παρούσα μελέτη. Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκαν :

1. Απιονισμένο νερό σε αναλογία 1:1, δηλαδή 7.247 kg τον χρόνο.
2. Υδροξείδιο του Καλίου (KOH) σε ποσοστό 1,2 % κατά βάρος, δηλαδή 87 kg περίπου κατά την διάρκεια ενός έτους [Chen and Tianzhong, 2012].
3. Τέλος η μεθανόλη προστίθεται στο διάλυμα σε αναλογία 9:1 mol [Chen and Tianzhong, 2012]. Για να βρούμε την κατάλληλη ποσότητα σε κιλά θα πρέπει να ακολουθήσουμε τους παρακάτω τύπους :

Μοριακό βάρος μεθανόλης $M_{\text{CH}_3\text{OH}} = 32,04 \text{ gr/mol}$

Μοριακό βάρος ελαίου $M_{\text{Oil}} = 282 \text{ gr/mol}$

Απαραίτητη παραδοχή ότι για την μεθανόλη ισχύει $1 \text{ gr} = 1 \text{ ml}$

Άρα :

$9 \text{ mol CH}_3\text{OH} \rightarrow 1 \text{ mol Ελαίου} \Leftrightarrow$

$288,36 \text{ gr CH}_3\text{OH} \rightarrow 282 \text{ gr Ελαίου (1)}$

$x:\text{ml CH}_3\text{OH} \rightarrow y:\text{gr Ελαίου (2)}$

Από (1) και (2) έχουμε : $x=1,02 y$

Δηλαδή για μετατροπή 7.247 kg ελαίου χρειαζόμαστε 7.391 kg μεθανόλης.

Για μετατροπή ενός κιλού ελαίου απαιτείται ενέργεια ίση με 0,666 kWh. Συνεπώς για μετατροπή 7.247 kg στο διάστημα ενός έτους καταναλώνονται 4.831,39 kWh/έτος [Schlagermann et al., 2012].

Από την διαδικασία αυτήν προκύπτουν 7.103 kg βιοντίζελ, αν υποθέσουμε ότι η μετατροπή που λαμβάνει χώρα φτάνει το 98%. Επιπλέον για κάθε κιλό βιοντίζελ παράγονται ως παραπροϊόν 0,13 kg γλυκερίνης, δηλαδή συνολικά σε έναν χρόνο συνθέτονται 943 kg ακατέργαστης γλυκερίνης.

3.2.3 Επιπλέον καταναλώσεις κατά την διάρκεια λειτουργίας

Για την λειτουργία της εγκατάστασης απαιτούνται επιπλέον:

- Δύο αντλίες των 21 m³/h με ισχύ 0,75 kW. Οι αντλίες αυτές θα λειτουργούν δώδεκα ώρες την ημέρα έτσι ώστε να μεταφέρουν τις απαραίτητες ποσότητες διαλύματος μεταξύ δεξαμενών και ταινιόδρομων. Η συνολική ετήσια κατανάλωση τους ανέρχεται στις 6.480 kWh/έτος.
- Ένας κοχλίας μεταφοράς για την μεταφορά της ξηρής βιομάζας άλγης διαμέτρου 90 χιλιοστών και ισχύς ενός ίππου (1hp=746 W). Οι ενεργειακές του απαιτήσεις είναι 3.222 kWh/έτος.
- Για τους απαραίτητους αυτοματισμούς αλλά και την φωτισμό του χώρου θεωρήσαμε ότι δαπανούνται ημερησίως (δηλαδή κατά τη διάρκεια των 12 ωρών λειτουργίας της επεξεργασίας) 12 kWh, δηλαδή 4.320 kWh/έτος.
- Τέλος αναπόσπαστο στοιχείο για την ορθή λειτουργία της εγκατάστασης είναι το ανθρώπινο δυναμικό. Θεωρήθηκαν λοιπόν 12 εργαζόμενοι.

Πίνακας 10: Συγκεντρωτικές εισροές-εκροές κάθε σταδίου για το είδος *Spirulina Platensis* σε ανοιχτή δεξαμενή

Στάδια	Δραστηριότητες/Υλικά	Μονάδα Μέτρησ ης	Τιμή (year ⁻¹)	Τιμή (kg ⁻¹ βιοντίζελ)
Κατασκευαστικά				
	Σίδερο Κτηρίου	kg	20.000	0,070
	Σίδερο Οπλισμού	kg	14.890	0,052
	Μπετόν	m ³	787	0,003
	Στεγανωτικό Χρώμα	kg	7.830	0,028
	Σωλήνες HDPE	kg	3.575	0,013
	Δεξαμενές LDPE	kg	700	0,002
	Σιλό Fiberglass	kg	345	0,001
	Πολυουρεθάνη	m ³	0,954	0,0001
	Αντλίες (2 x 0,75 kW)	kWh	6.480	0,899
	Κοχλίας Μεταφ. (746 W)	kWh	3.222	0,446

	Αυτοματισμοί-Φώτα	kWh	4.320	0,599
Καλλιέργεια				
Εισροές	Χρήση Γης	m ²	15.000	2,112
	Νερό	m ³	9.200	1,295
	CO ₂	kg	120.561	16,65
	Λιπάσματα	kg	1.260	0,177
	Λειτουργία Paddlewheel	kWh	86.400	11,98
Εκροές	Μείγμα Βιομάζας-Νερού	m ³	90.000	12,671
Συγκομιδή /Ξήρανση				
Εισροές	Μείγμα Βιομάζας-Νερού	m ³	90.000	12,671
	Λειτουργία Ταινιοδrom.	kWh	7.258	1,006
	Λάβες Ξήρανσης (3 x 42 x 100 W)	kWh	54.432	7,549
Εκροές	Ξηρή Βιομάζα Άλγης	kg	65.880	9,1
Εκχύλιση				
Εισροές	Ξηρή Βιομάζα Άλγης	kg	65.880	9,1
	Εξάνιο	kg	3.294	0,45
	Ρεύμα Λειτουργίας και Θέρμανσης Soxhlet	kWh	12.899	1,816
Εκροές	Έλαιο Άλγης	kg	7.247	1,02
	Pellet	kg	58.633	8,1
Μετατροπή σε Βιοντίζελ				
Εισροές	Έλαιο Άλγης	kg	7.247	1,02
	Μεθανόλη	kg	7.391	1,04
	Υδροξείδιο του Καλίου	kg	87	0,012
	Απιονισμένο Νερό	kg	7.247	1,02
	Ρεύμα Λειτουργίας	kWh	4.831,4	0,666
Εκροές	Ακατέργαστη Γλυκερίνη	kg	943	0,13
	Βιοντίζελ	kg	7.103	-

3.2 Ανάλυση Κύκλου Ζωής Καλλιέργειας του Είδους Nannochloropsis Sp. σε Ανοιχτή Δεξαμενή

Η μεθοδολογία λειτουργίας της διαδικασίας παραμένει ίδια στο σενάριο αυτό. Το μόνο που διαφοροποιείται είναι το είδος της άλγης το οποίο εξετάζουμε. Συνεπώς, λόγω των διαφορετικών του χαρακτηριστικών θα προκύψουν νέα μεγέθη ξηρής βιομάζας, αλλά και τελικού βιοντίζελ.

Πίνακας 11: Χαρακτηριστικά για το είδος Nannochloropsis sp.

Είδος άλγης	Παραγωγικότητα(g/L/d)	Ποσοστό Λιπιδίων
Nannochloropsis sp.	0,09	30 %

Παρακάτω συνοψίζονται οι διαφοροποιήσεις που εμφανίζονται σε ετήσια βάση :

1. Αρχικά, η σημαντικότερη αλλαγή εντοπίζεται στην αναμενόμενη ετήσια ποσότητα ξηρής βιομάζας άλγης κατά το στάδιο της συγκομιδής και ξήρανσης. Συγκεκριμένα λόγω της χαμηλότερης παραγωγικότητας του είδους Nannochloropsis sp. σε σχέση με αυτήν του είδους Spirulina Platensis (0,09 και 0,183 αντίστοιχα), η ξηρή βιομάζα φτάνει τα 32.400 kg/year.
2. Όσο αναφορά τα κατασκευαστικά, η μόνη αλλαγή εμφανίζεται στην ποσότητα πολυουθεράνης που χρησιμοποιείται για μόνωση της διάταξης Soxhlet. Λόγω της μειωμένης, σε σχέση με το πρώτο σενάριο, ετήσιας παραγωγής ξηρής βιομάζας, ο απαιτούμενος όγκος του δοχείου βρασμού είναι 300L. Συνεπώς για την επικάλυψη του χρειάζονται πλέον 0,704 m³ πολυουθεράνης.
3. Το διοξείδιο του άνθρακα που απορροφάται κατά το στάδιο της καλλιέργειας εξαρτάται άμεσα από την ποσότητα ξηρής βιομάζας. Άρα, η δέσμευση διοξειδίου του άνθρακα από την ατμόσφαιρα μειώνεται στα 59.292 kg τον χρόνο.

4. Στο στάδιο της εκχύλισης όλα τα στοιχεία διαφοροποιούνται, καθώς αλλάζει η ποσότητα της ξηρής βιομάζας που επεξεργάζεται, αλλά και το ποσοστό λιπιδίων του εξεταζομένου είδους. Πιο αναλυτικά :

- Το ποσό του εξανίου που απαιτείται για την εκχύλιση 32.400 kg βιομάζας είναι 1.620 kg.
- Για την λειτουργία του μηχανισμού πλέον καταναλώνονται 11.833 kWh/year. Η μείωση αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι όπως προαναφέραμε η μεγαλύτερη ενέργεια δαπανάται για την αρχική θέρμανση του εξανίου, η οποία εξαρτάται από την μάζα του.
- Λόγω του μεγαλύτερου ποσοστού λιπιδίων (30%), το τελικό έλαιο που προκύπτει από το στάδιο αυτό είναι 9.720 kg, δηλαδή 25% αυξημένο σε σχέση με το πρώτο σενάριο καλλιέργειας. Συμπεραίνουμε λοιπόν, ότι τελικά μπορούμε να ανακτήσουμε μεγαλύτερη ποσότητα ελαίου βάση των λιπιδίων της άλγης και όχι βάση της ποσότητας της ξηρής βιομάζας.

$$32.400 * 0,3 = 9.720 \text{ kg}$$

- Επίσης το pellet που παράγεται στο διάστημα ενός χρόνου δεν ξεπερνά πλέον τα 22.680 kg.
5. Όπως είναι αντιληπτό τα μεγέθη για το στάδιο της μετατροπής του ελαίου σε βιοντίζελ θα υπολογιστούν εκ νέου. Έτσι έχουμε για την μετατροπή 9.720 kg ελαίου άλγης :

- 9.914 kg/έτος Μεθανόλη
- 116,6 kg/έτος Υδροξείδιο του Καλίου
- 9.720 kg/έτος Απιονισμένο Νερό
- 6.480 kWh/έτος Ενεργειακές Απαιτήσεις

Προϊόντα :

- 1.264 kg/έτος Ακατέργαστη Γλυκερίνη
- 9.526 kg/έτος Βιοντίζελ

**Πίνακας 12: Συγκεντρωτικές εισροές-εκροές κάθε σταδίου για το είδος
Nannochloropsis Sp. σε ανοιχτή δεξαμενή.**

Στάδια	Δραστηριότητες/Υλικά	Μονάδα Μέτρησ ης	Τιμή (year ⁻¹)	Τιμή (kg ⁻¹ βιοντίζελ)
Κατασκευαστικά				
	Σίδερο Κτηρίου	kg	20.000	0,052
	Σίδερο Οπλισμού	kg	14.890	0,039
	Μπετόν	m ³	787	0,002
	Στεγανωτικό Χρώμα	kg	7.830	0,021
	Σωλήνες HDPE	kg	3.575	0,009
	Δεξαμενές LDPE	kg	700	0,002
	Σιλό Fiberglass	kg	345	0,001
	Πολυουρεθάνη	m ³	0,704	0,00007
	Αντλίες (2 x 0,75kW)	kWh	6.480	0,68
	Κοχλίας Μεταφ. (746W)	kWh	3.222	0,338
	Αυτοματισμοί-Φώτα	kWh	4.320	0,453
Καλλιέργεια				
Εισροές	Χρήση Γης	m ²	15.000	1,575
	Νερό	m ³	9.200	0,966
	CO ₂	kg	59.292	6,09
	Λιπάσματα	kg	1.260	0,132
	Λειτουργία Paddlewheel	kWh	86.400	9,069
Εκροές	Μείγμα Βιομάζας-Νερού	m ³	90.000	9,448
Συγκομιδή /Ξήρανση				
Εισροές	Μείγμα Βιομάζας-Νερού	m ³	90.000	9,448
	Λειτουργία Ταινιόδρομ.	kWh	7.258	0,762
	Λάβες Ξήρανσης (3 x 42 x 100 W)	kWh	54.432	75,714
Εκροές	Ξηρή Βιομάζα Άλγης	kg	32.400	3,34

Εκχύλιση				
Εισροές	Ξηρή Βιομάζα Άλγης	kg	32.400	3,34
	Εξάνιο	kg	1.620	0,166
	Ρεύμα Λειτουργίας και Θέρμανσης Soxhlet	kWh	11.833	1,242
Εκροές	Έλαιο Άλγης	kg	9.720	1,02
	Pellet	kg	22.680	2,33
Μετατροπή σε Βιοντίζελ				
Εισροές	Έλαιο Άλγης	kg	9.720	1,02
	Μεθανόλη	kg	9.914	1,04
	Υδροξείδιο του Καλίου	kg	116,6	0,012
	Απιονισμένο Νερό	kg	9.720	1,02
	Ρεύμα Λειτουργίας	kWh	6.480	0,666
Εκροές	Ακατέργαστη Γλυκερίνη	kg	1.264	0,13
	Βιοντίζελ	kg	9.526	-

Όπως παρατηρούμε από τον παραπάνω πίνακα οι τιμές πολλών δραστηριοτήτων-υλικών ανά κιλού παραγόμενου βιοντίζελ έχουν μεταβληθεί, καθώς όσο μεγαλώνει η τελική ποσότητα του βιοντίζελ, τόσο μικραίνει η συνεισφορά ορισμένων στοιχείων.

3.3 Ανάλυση Κύκλου Ζωής Καλλιέργειας του Είδους *Spirulina Platensis* σε Κλειστή Δεξαμενή

Σκοπός

Στο τρίτο αυτό σενάριο διερευνήσαμε ένα θεωρητικό μοντέλο για καλλιέργεια του είδους *Spirulina Platensis*. Το μοντέλο αυτό βασίζεται στην δυνατότητα αύξησης της παραγωγής της άλγης μέσω έκθεσής της σε τεχνητό φως για 24 ώρες την ημέρα. Στις ανοιχτές καλλιέργειες τις οποίες εξετάσαμε νωρίτερα, η δυνατότητα φωτοσύνθεσης της άλγης περιορίζεται σε ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα κατά την διάρκεια της ημέρας, λόγω της έλλειψης ηλιακού φωτός τις υπόλοιπες ώρες. Ο περιορισμός αυτός εκφράζεται με έναν δείκτη γνωστό ως «capacity factor», ο οποίος όσο αναφορά το ηλιακό φως ερμηνεύει το ποσοστό των ωρών ενός χρόνου (8.640 ώρες) βάση των οποίων προκύπτει η συνολική παραγωγή. Για ηλιόλουστες περιοχές όπως η Κρήτη ο δείκτης αυτός κυμαίνεται λίγο κάτω από το 20% (Δηλαδή σχεδόν 1.728 ώρες). Στο σενάριο λοιπόν που διερευνήσαμε τοποθετώντας τεχνητό φως για 24 ώρες τη ημέρα θεωρήσαμε ότι η παραγωγικότητα της άλγης μπορεί να φτάσει την τετραπλάσια (75-80% capacity factor) αφήνοντας ένα ποσοστό 20-25% για πιθανότητα διαφόρων σφαλμάτων.

Διοξείδιο του άνθρακα

Βάση της εξίσωσης της φωτοσύνθεσης είναι απαραίτητος και ο τετραπλασιασμός του προσλαμβανόμενου διοξειδίου του άνθρακα. Πλέον το CO₂ δεν δεσμεύεται από την ατμόσφαιρα, καθώς η καλλιέργεια γίνεται σε κλειστά θερμοκήπια. Διοχετεύεται λοιπόν μέσα στα θερμοκήπια από παραπλήσια εγκατάσταση εξόρυξης λιγνίτη.

Σίδηρο Κατασκευής

Τα θερμοκήπια (σκεπασμένες δεξαμενές) ύψους δύο μέτρων είναι καλυμμένα με νάilon (πολυαιθυλένιο) 1.134 m² το κάθε ένα. Για την στήριξη του νάilon και τις βάσεις τοποθέτησης των λαμπτήρων απαιτούνται συνολικά και για τα δέκα θερμοκήπια 50 τόνοι επιπλέον σίδηρο, το οποίο προσθέσαμε στο υπάρχον σίδηρο οπλισμού.

$$(111m + 111m + 6m + 6m) * 2m + 666m^2 = 1134 m^2 \text{ (Εξίσωση 3.3.1)}$$

Ενέργεια Φωτοσύνθεσης/Φως

Συμφώνα με μελέτη [www.fao.org, 1991], η απαραίτητη ένταση του φωτός για την ανάπτυξη της άλγης κυμαίνεται ανάμεσα στα 2.500 και 5.000 lux. Τα συγκεκριμένα θεωρητικά μοντέλα εξετάστηκαν με βάση τα 4.000 lux (κατόπιν εξακρίβωσης της καταλληλότητας της τιμής μέσω της βιομηχανίας). Επιλέχθηκαν λοιπόν λάμπες τύπου SMD LED (μοντέλο 3014) για δύο βασικούς λόγους :

1. Δεν αναπτύσσουν θερμοκρασία κατά την λειτουργία τους και συνεπώς δεν επηρεάζουν αρνητικά την καλλιέργεια,
2. Έχουν υψηλή απόδοση σε σχέση με την κατανάλωσή τους.

Πίνακας 13: Χαρακτηριστικά λαμπτήρων [www.wikipedia.org].

Τύπος	Κατανάλωση (W)	Απόδοση (lumen)
SMD LED (3014)	0,1	10-13 (11)

Συνεπώς σύμφωνα με την αναλογία lux:lumen ($1 \text{ lux} = 1 \text{ lumen/m}^2$) πραγματοποιήθηκαν οι εξής υπολογισμοί :

$$\frac{4.000 \frac{\text{lumen}}{\text{m}^2}}{11 \text{ lumen}} * 6666 \text{ m}^2 (\text{συνολική έκταση}) = 2.421.820 \text{ led} (\text{Εξίσωση 3.3.2})$$

$$2.421.820 \text{ led} * 0,1 \text{ Watt} * 24 \text{ hours} * 360 \text{ days} = 2.092.452 \text{ kWh/έτος} (\text{Εξίσωση 3.3.3})$$

Οι λάμπες τοποθετήθηκαν σε απόσταση 10 cm πάνω από το νερό για να επιτυγχάνεται όσο το δυνατόν καλύτερη απορρόφηση του φωτός από τα μικροφύκη. Τέλος, για το στάδιο της εκχύλισης θα χρησιμοποιηθούν τρεις ίδιες διατάξεις Soxhlet των 500 L, έτσι ώστε να μπορεί να ολοκληρωθεί η συγκεκριμένη διεργασία στο διάστημα των οχτώ ωρών. Τα υπόλοιπα στάδια της διαδικασίας παραμένουν ίδια, αλλά μεταβάλλονται οι τιμές τους, καθώς αυξάνεται σε μεγάλο βαθμό η παραγωγή της άλγης σε ημερήσια και ετήσια βάση.

Βαθμονμέρες

Όπως αναφέραμε και νωρίτερα η θερμοκρασία παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην ανάπτυξη της άλγης. Συνεπώς, για να είναι δυνατή η αναπαραγωγή της άλγης 24 ώρες την ημέρα είναι απαραίτητη η διατήρηση τις θερμοκρασίας μέσα σε συγκεκριμένα επιθυμητά όρια (18-26°C). Βάση λοιπόν των θερμικών απωλειών των θερμοκηπίων υπολογίσαμε την απαιτούμενη ενέργεια που χρειάζεται για θέρμανση και ψύξη της εγκατάστασης με σκοπό να επιτευχθούν τα επιθυμητά όρια. Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό, είναι αυτή των βαθμοημερών. Ως βαθμοημέρα ορίζεται η διαφορά μεταξύ της μέσης ημερήσιας θερμοκρασίας και της εκάστοτε επιθυμητής θερμοκρασίας. Οι βαθμοημέρες διακρίνονται σε θέρμανσης και ψύξης.

Υπολογισμός ενέργειας για θέρμανση:

$$Q = \frac{K_{cond} + K_{tot}}{n} * DDH = \frac{0,33 \frac{W}{K} + 6,5 \frac{W}{m^2 * K} * 11340 m^2}{1} * 702 K * 24 Hours = 1.241.871.640 Wh = 1,241 GWh_{(Εξίσωση 3.3.4)}$$

Όπου n: Θεωρητική απόδοση συστήματος θέρμανσης

HDD: Σύνολο ετήσιων βαθμοημερών θέρμανσης για την περιοχή του Ηρακλείου και θερμοκρασία αναφοράς τους 18°C [Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-3/2010].

$$K_{TOT} = \rho \times C_p \times V + U \times A$$

ρ : Πυκνότητα του αέρα (kg/m³)

C_p : Ειδική Θερμοχωρητικότητα του αέρα (kJ/kg x K)

V : Αλλαγές αέρα ανά ώρα (m³/h)

U : Συντελεστής Θερμικής Αγωγιμότητας (W/m² x K)

A : Συνολική Επιφάνεια (m²)

Υπολογισμός ενέργειας για ψύξη:

$$Q = \frac{K_{tot}}{n} * CDD = \frac{0,33 \frac{W}{K} + 6,5 \frac{W}{m^2 * K} * 11340 m^2}{1} * 1334 K = 98.329.580 Wh =$$

98,329 MWh (Εξίσωση 3.3.5)

Όπου: CDD: Σύνολο ετήσιων βαθμωρών ψύξης για την περιοχή του Ηρακλείου και θερμοκρασία αναφοράς τους 26 °C. [Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-3/2010]. Άρα η συνολική ενέργεια για θέρμανση και ψύξη της εγκατάστασης στην διάρκεια του χρόνου είναι 1.340.201 kWh/έτος.

Πίνακας 14: Συγκεντρωτικές εισροές-εκροές κάθε σταδίου για το είδος *Spirulina Platensis* σε κλειστή δεξαμενή.

Στάδια	Δραστηριότητες/ Υλικά	Μονάδα Μέτρησης	Τιμή (year ⁻¹)	Τιμή (kg ⁻¹ βιοντίζελ)
Κατασκευαστικά				
	Σίδερο Κτηρίου	kg	20.000	0,017
	Σίδερο Οπλισμού	kg	64.890	0,057
	Μπετόν	m ³	787	0,0007
	Στεγανωτικό Χρώμα	kg	7.830	0,0068
	Σωλήνες HDPE	kg	3.575	0,003
	Δεξαμενές LDPE	kg	700	0,0006
	Σιλό Fiberglass	kg	345	0,0003
	Νάιλον (Πολυαιθυλένιο)	m ²	11.340	0,01
	Πολυουρεθάνη	m ³	2,862	0,0001
	Αντλίες (2 x 0,75kW)	kWh	6.480	0,228
	Κοχλίας Μεταφ. (746W)	kWh	3.222	0,113
	Αυτοματισμοί-Φώτα	kWh	4.320	0,152
	Βαθμοημέρες	kWh	1.340.201	47,17
Καλλιέργεια				
Εισροές	Χρήση Γης	m ²	15.000	0,528
	Νερό	m ³	2.720	0,095

	CO ₂	kg	482.242	16,65
	Λιπάσματα	kg	1.260	0,044
	Λειτουργία Paddlewheel	kWh	86.400	3,041
	Λειτουργία LED	kWh	2.092.452	54,916
Εκροές	Μείγμα Βιομάζας- Νερού	m ³	90.000	3,168
Συγκομιδή /Ξήρανση				
Εισροές	Μείγμα Βιομάζας- Νερού	m ³	90.000	3,168
	Λειτουργία Ταινιόδρομ.	kWh	7.258	0,255
	Λάβες Ξήρανσης (3 x 42 x 100 W)	kWh	54.432	1,916
Εκροές	Ξηρή Βιομάζα Άλγης	kg	263.520	9,1
Εκχύλιση				
Εισροές	Ξηρή Βιομάζα Άλγης	kg	263.520	9,1
	Εξάνιο	kg	13.176	0,45
	Ρεύμα Λειτουργίας και Θέρμανσης Soxhlet	kWh	4.0784,4	1,436
Εκροές	Έλαιο Άλγης	kg	28.988	1,02
	Pellet	kg	234.532	8,1
Μετατροπή σε Βιοντίζελ				
Εισροές	Έλαιο Άλγης	kg	28.988	1,02
	Μεθανόλη	kg	29.567	1,04
	Υδροξείδιο του Καλίου	kg	348	0,012
	Απιονισμένο Νερό	kg	28.988	1,02
	Ρεύμα Λειτουργίας	kWh	19.325,5	0,666
Εκροές	Ακατέργαστη Γλυκερίνη	kg	3.768	0,13
	Βιοντίζελ	kg	28.409	-

3.4 Ανάλυση Κύκλου Ζωής Καλλιέργειας του Είδους Nannochloropsis Sp. σε Κλειστή Δεξαμενή

Οι παραδοχές και οι προσθήκες που πραγματοποιήθηκαν στο υποκεφάλαιο 3.3 ισχύουν και στο ακόλουθο σενάριο, απλά διαφοροποιείται το εξεταζόμενο είδος άλγης (*Nannochloropsis* sp). Παρόμοια με την σχέση των δύο πρώτων σεναρίων, έτσι και εδώ η κύρια μεταβολή διαμορφώνεται στην ποσότητα παραγωγής ξηρής βιομάζας, αλλά και τελικού βιοντίζελ, λόγω διαφορετικής παραγωγικότητας και ποσοστού λιπιδίων μεταξύ των δύο ειδών.

Η εκχύλιση των 129.600 kg ξηρής βιομάζας πραγματοποιήθηκε σε δύο διατάξεις Soxhlet των 500 L.

**Πίνακας 15: Συγκεντρωτικές εισροές-εκροές κάθε σταδίου για το είδος
Nannochloropsis Sp. σε κλειστή δεξαμενή.**

Στάδια	Δραστηριότητες/Υλικά	Μονάδα Μέτρησης	Τιμή (year ⁻¹)	Τιμή (kg ⁻¹ biodiesel)
Κατασκευαστικά				
	Σίδερο Κτηρίου	kg	20.000	0,0131
	Σίδερο Οπλισμού	kg	64.890	0,0425
	Μπετόν	m ³	787	0,0005
	Στεγανωτικό Χρώμα	kg	7.830	0,0051
	Σωλήνες HDPE	kg	3.575	0,0023
	Δεξαμενές LDPE	kg	700	0,0004
	Σιλό Fiberglass	kg	345	0,0002
	Νάιλον (Πολυαιθυλένιο)	m ²	11.340	0,0074
	Πολυουρεθάνη	m ³	1,908	0,00005
	Αντλίες (2 x 0,75kW)	kWh	6.480	0,170
	Κοχλίας Μεταφ. (746W)	kWh	3.222	0,084
	Αυτοματισμοί-Φώτα	kWh	4.320	0,113
	Βαθμομηόμερες	kWh	1.340.20 1	35,17
Καλλιέργεια				
Εισροές	Χρήση Γης	m ²	15.000	0,394
	Νερό	m ³	2.720	0,071
	CO ₂	kg	237.168	6,09
	Λιπάσματα	kg	1.260	0,033
	Λειτουργία Paddlewheel	kWh	86.400	2,267
	Λειτουργία LED	kWh	2.092.45 2	73,654
Εκροές	Μείγμα Βιομάζας-Νερού	m ³	90.000	2,362
Συγκομιδή				

/Ξήρανση				
Εισροές	Μείγμα Βιομάζας-Νερού	m ³	90.000	2,362
	Λειτουργία Ταινιόδρομ.	kWh	7.258	0,190
	Λάμπες Ξήρανσης (3 x 42 x 100 W)	kWh	54.432	1,428
Εκροές	Ξηρή Βιομάζα Άλγης	kg	129.600	9,1
Εκχύλιση				
Εισροές	Ξηρή Βιομάζα Άλγης	kg	129.600	9,1
	Εξάνιο	kg	6.480	0,45
	Ρεύμα Λειτουργίας και Θέρμανσης Soxhlet	kWh	25.728	0,675
Εκροές	Έλαιο Άλγης	kg	38.880	1,02
	Pellet	kg	90.720	2,33
Μετατροπή σε Βιοντίζελ				
Εισροές	Έλαιο Άλγης	kg	38.880	1,02
	Μεθανόλη	kg	39.658	1,04
	Υδροξείδιο του Καλίου	kg	467	0,012
	Απιονισμένο Νερό	kg	38.880	1,02
	Ρεύμα Λειτουργίας	kWh	25.920	0,666
Εκροές	Ακατέργαστη Γλυκερίνη	kg	5.054	0,13
	Βιοντίζελ	kg	38.103	-

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

4.1 Μέθοδος Ανάλυσης Αποτελεσμάτων

Το λογισμικό SimaPro7 περιέχει διάφορες μεθόδους αποτίμησης αντίκτυπου. Η βασική δομή των μεθόδων αποτίμησης αντίκτυπου είναι η εξής :

1. Characterisation – Χαρακτηρισμός
2. Damage Assessment – Αποτίμηση βλάβης
3. Normalisation – Κανονικοποίηση
4. Weighting – Στάθμιση
5. Addition – Πρόσθεση

Εκτός από το πρώτο βήμα τα επόμενα τέσσερα είναι προαιρετικά σύμφωνα με τα πρότυπα ISO, επομένως δεν είναι διαθέσιμα και τα πέντε βήματα σε όλες τις μεθόδους που προσφέρονται για την αποτίμηση [PRé, various authors, 2014].

1. Characterisation – Χαρακτηρισμός

Οι ουσίες που συνεισφέρουν σε μια κατηγορία ευρείας επίδρασης πολλαπλασιάζονται με κάποιο αντίστοιχο συντελεστή (Characterisation Factor) ο οποίος εκφράζει το βαθμό συνεισφοράς της εκάστοτε ουσίας στην αντίστοιχη κατηγορία επίδρασης. Για παράδειγμα, ο παράγοντας χαρακτηρισμού για το CO₂ στην κατηγορία επιπτώσεων αλλαγής του κλίματος μπορεί να είναι ίσος με 1, ενώ ο παράγοντας χαρακτηρισμού του μεθανίου μπορεί να είναι 25. Αυτό σημαίνει ότι η απελευθέρωση 1 kg μεθανίου προκαλεί το ίδιο ποσό κλιματικής αλλαγής με 25 kg CO₂. Το αποτέλεσμα εκφράζεται σε δείκτες κατηγορίας ευρείας επίδρασης (Impact Category Indicators).

2. Damage Assessment – Αποτίμηση βλάβης

Σκοπός του συγκεκριμένου βήματος είναι ο συνδυασμός ενός αριθμού δεικτών κατηγορίας ευρείας επίδρασης σε μια ευρύτερη κατηγορία βλάβης (Damage Category). Συνοψίζοντας τις επιβαρύνσεις σε συγκεκριμένες ευρύτερες

κατηγορίες είναι ευκολότερο να αξιολογήσουμε τη συνολική επιβάρυνση που προκαλείται από κάθε κατηγορία ευρείας επίδρασης στις κατηγορίες βλάβης.

3. Normalisation – Κανονικοποίηση

Στο βήμα αυτό δίνεται η δυνατότητα σύγκρισης των δεικτών κατηγορίας ευρείας επίδρασης με ένα καθορισμένο σημείο αναφοράς. Η σύγκριση αυτή επιτυγχάνεται διαιρώντας τους δείκτες με το σημείο αναφοράς, ανάγοντας έτσι όλους τους δείκτες στην ίδια μονάδα μέτρησης. Το βήμα αυτό μπορεί να εφαρμοστεί τόσο στα αποτελέσματα που προκύπτουν από το πρώτο βήμα, όσο και από αυτά που προκύπτουν από το δεύτερο. Ως σημείο αναφοράς χρησιμοποιείται ευρέως το μέσο ετήσιο περιβαλλοντικό φορτίο ανά χώρα ή ήπειρο, διαιρούμενο με τον αντίστοιχο πληθυσμό.

4. Weighting – Στάθμιση

Σε αυτό το στάδιο πολλαπλασιάζονται οι δείκτες κατηγορίας ευρείας επίδρασης ή οι αντίστοιχοι δείκτες από τις κατηγορίες βλάβης (Damage Category Indicators) με συντελεστές στάθμισης (weighting factor). Το βήμα αυτό έχει τη δυνατότητα να εφαρμοστεί σε κανονικοποιημένα ή μη δεδομένα.

5. Addition – Πρόσθεση

Στο τελικό αυτό βήμα προστίθενται τα αποτελέσματα για να δημιουργήσουν μία τελική ή ενιαία βαθμολογία.

Υπάρχουν πολλές μέθοδοι σύγκρισης και παρουσίασης των αποτελεσμάτων, οι οποίες διαφέρουν μεταξύ τους βάσει των διαφορετικών κανονισμών των χωρών στις οποίες αναφέρονται αλλά και της εξειδίκευσης τους σε συγκεκριμένες κατηγορίες βλάβης. Η μέθοδος που επιλέξαμε είναι η Europe Recipe Endpoint. Αποτελεί μία από τις πιο διαδεδομένες μεθόδους που αφορούν τους Ευρωπαϊκούς κανονισμούς. Στην ουσία είναι ο συνδυασμός δύο άλλων μεθόδων της Eco-indicator 99 και της CML-IA. Επιπλέον παρέχει την δυνατότητα χρήσης και των πέντε παραπάνω βημάτων. Η συγκεκριμένη μέθοδος έχει την δυνατότητα εξαγωγής αποτελεσμάτων σε ενδιάμεσο στάδιο (midpoint) και σε τελικό στάδιο (endpoint). Στην πρώτη περίπτωση καταλήγουμε σε πολλές διαφορετικές κατηγορίες επιπτώσεων με μικρή σχετικά αβεβαιότητα για τα

αποτελέσματα, αλλά ταυτόχρονα καθιστά την εξαγωγή συμπερασμάτων αρκετά πολύπλοκη. Στην δεύτερη περίπτωση οι κατηγορίες επιπτώσεων περιορίζονται σε τρεις ευρύτερες, κάτι το οποίο οδηγεί σε μεγαλύτερη αβεβαιότητα, αλλά αρκετά ευκολότερα και πιο κατανοητά συμπεράσματα. Τα αποτελέσματα στο μοντέλο μας επεξεργάστηκαν με βάση το τελικό στάδιο (endpoint). Έτσι λοιπόν οι κατηγορίες περιβαλλοντικών επιπτώσεων είναι οι εξής τρεις.

1. Damage to Human Health – Βλάβες στην Ανθρώπινη υγεία

Τα αποτελέσματα εκφράζονται ως αριθμός ετών ζωής που χάθηκαν και αριθμός ετών ζωής σε αναπηρία. Από το συνδυασμό αυτών προκύπτει η αντίστοιχη μονάδα μέτρησης DALY (Disability Adjusted Life Years)

2. Damage to Ecosystem Quality – Βλάβες στην Ποιότητα Οικοσυστήματος

Τα αποτελέσματα εκφράζονται ως αριθμός ειδών που εξαφανίσθηκαν σε καθορισμένη περιοχή για καθορισμένο χρονικό διάστημα.

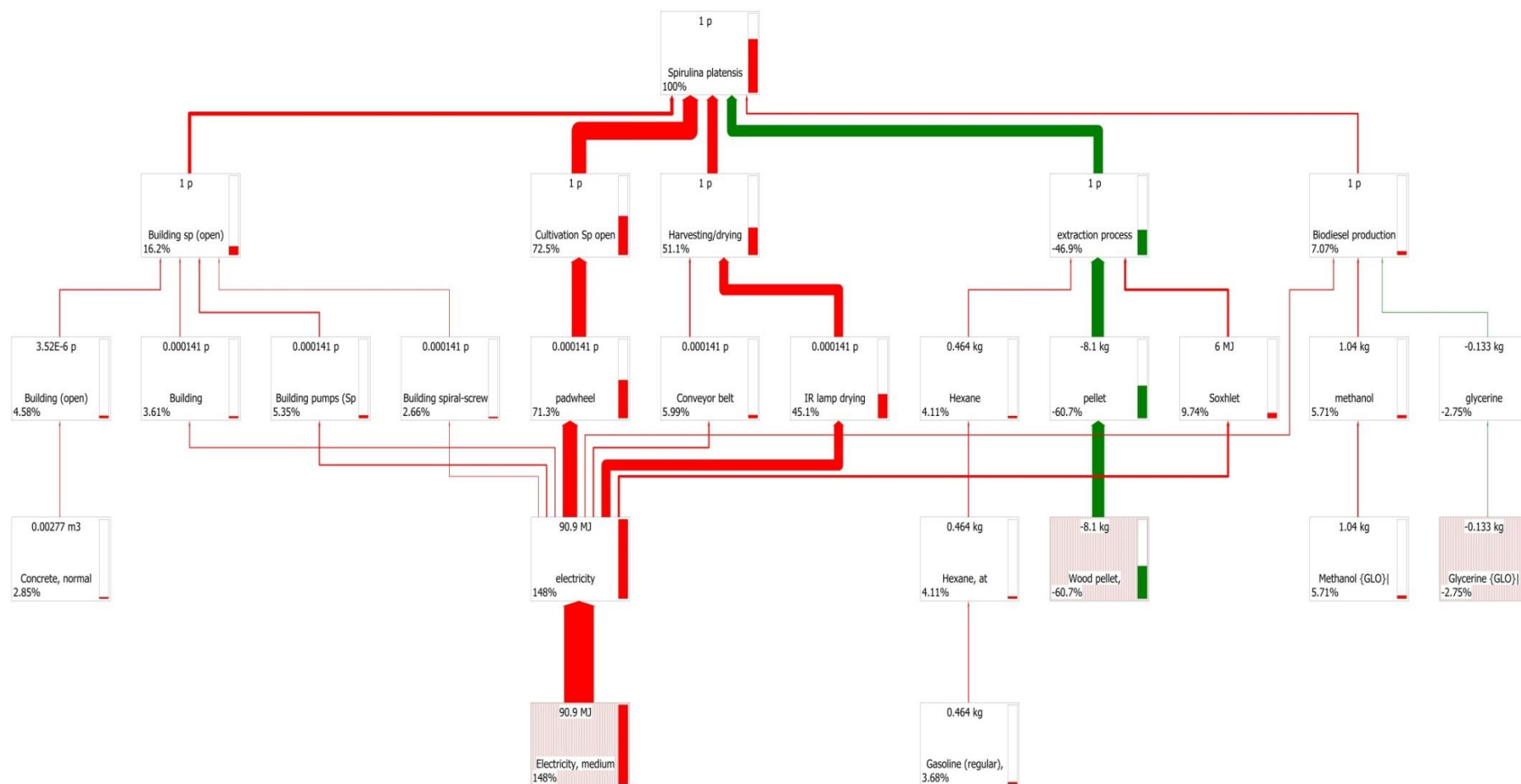
3. Damage to Resources – Βλάβες στους Πόρους

Τα αποτελέσματα εκφράζονται ως πλεόνασμα ενέργειας που απαιτείται για μελλοντική εξαγωγή ορυκτών καυσίμων.

4.2 Αποτελέσματα ανά καλλιέργεια

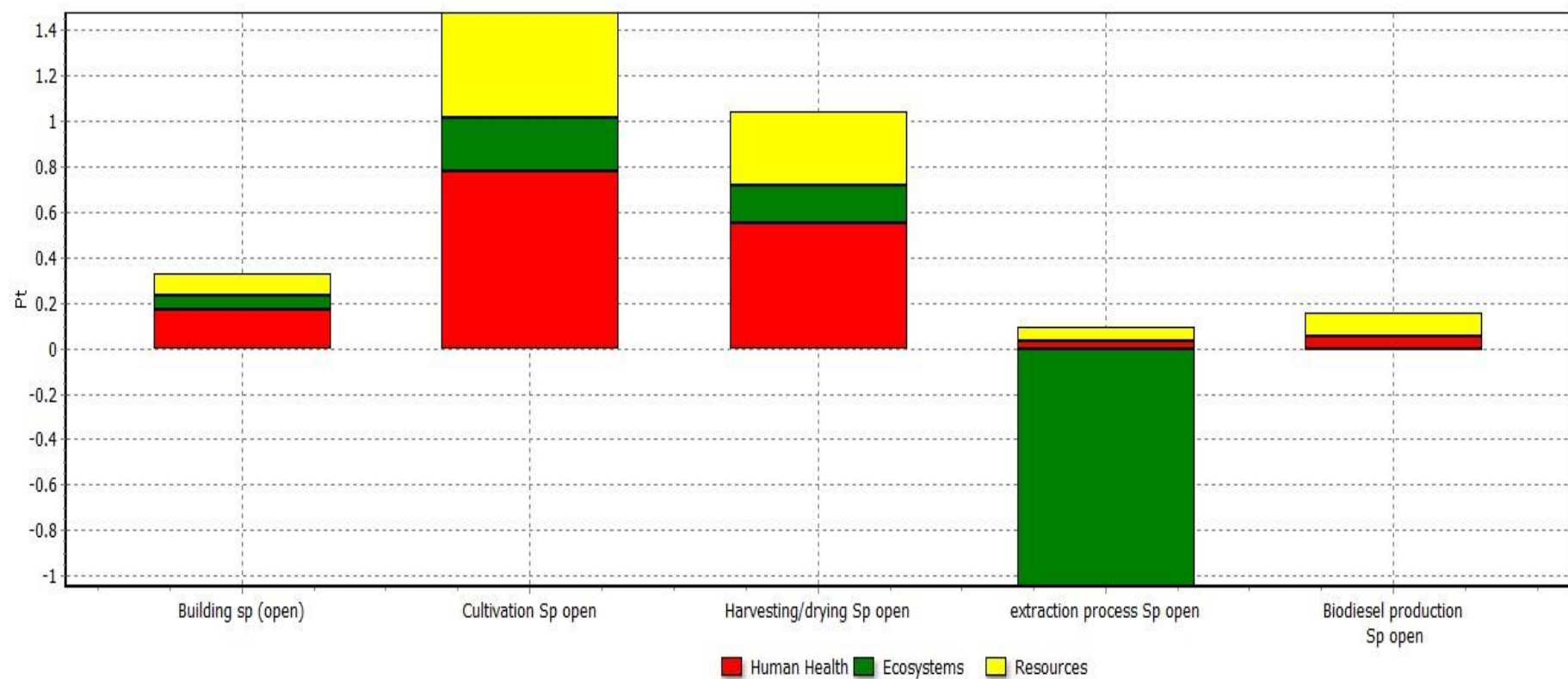
Η σύγκριση που έγινε αφορά αρχικά τα διάφορα στάδια της κάθε καλλιέργειας με βάση τις επιβαρύνσεις που προκύπτουν ανά ένα κιλό παραγόμενης ποσότητας βιοντίζελ. Στην συνέχεια προχωρήσαμε σε σύγκριση μεταξύ των τεσσάρων καλλιεργειών. Η μονάδα Pt που εμφανίζεται στα διαγράμματα περιβαλλοντικών επιβαρύνσεων ισούται με το ένα χιλιοστό του περιβαλλοντικού αποτυπώματος του μέσου ευρωπαϊού πολίτη σε διάστημα ενός έτους.

4.2.1 Καλλιέργεια του είδους *Spirulina Platensis* σε ανοιχτή δεξαμενή



Διάγραμμα 3: Διάγραμμα ροής ποσοστού περιβαλλοντικών φορτίων ανά κιλό παραγόμενου βιοντίζελ για την καλλιέργεια του είδους *Spirulina Platensis* σε ανοιχτή δεξαμενή.

Όπως παρατηρούμε από το παραπάνω δένδρογραμμα η μέγιστη επιβάρυνση (148%) προκαλείται από την ενέργεια που δαπανάται για την επεξεργασία της άλγης, ενώ τα υπόλοιπα στοιχεία αποτελούν μόνο το 14,4% της συνολικής επιβάρυνσης. Συγκεκριμένα η ανάδευση του μείγματος εντός των δεξαμενών απαιτεί το 71,3% της συνολικής ενέργειας. Μεγάλο ποσοστό επιβάρυνσης της τάξης του 45,1% προσθέτει και η ενεργειακή κατανάλωση κατά το στάδιο ξήρανσης της άλγης με τη χρήση των ειδικών λαμπτήρων. Το ποσοστό του 148% συμπληρώνουν η λειτουργία του Soxhlet, του ταινιόδρομου και των υπόλοιπων αυτοματισμών εντός της εγκατάστασης με ποσοστά επιβάρυνσης 9,74%, 5,99% και 15,87% αντίστοιχα. Αξίζει να σημειωθεί ότι μεγάλη μείωση (60,7%) στο συνολικό αποτύπωμα προκύπτει από την παραγωγή του pellet ως παραπροϊόν, ενώ μικρή θετική συνεισφορά (2,75%) έχει και η γλυκερίνη.



Analyzing 1 p 'Spirulina platensis (open) process';
 Method: ReCiPe Endpoint (H) V1.10 / Europe ReCiPe H/A / Single score

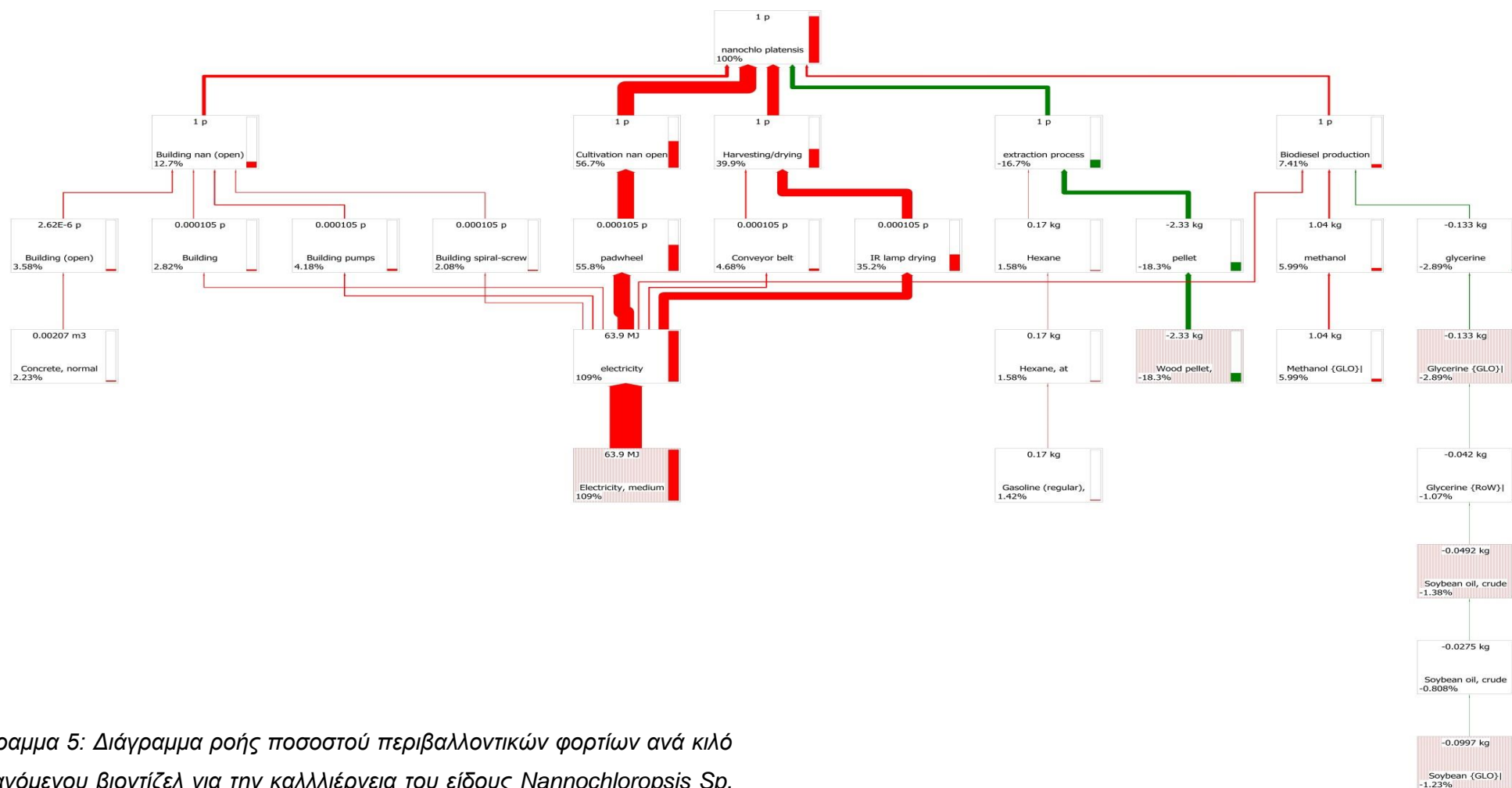
Διάγραμμα 4: Κατανομή περιβαλλοντικών επιβαρύνσεων σε κατηγορίες βλάβης ανά κιλό παραγόμενου βιοντίζελ για την καλλιέργεια του είδους *Spirulina Platensis* σε ανοιχτή δεξαμενή.

Γίνεται αντιληπτό από το παραπάνω διάγραμμα ότι ο τομέας που επιβαρύνεται σε μεγαλύτερο βαθμό συνολικά από όλη τη διεργασία είναι η ανθρώπινη υγεία (1,58 Pt). Εν συνεχεία εμφανίζεται εξίσου μεγάλη επιβάρυνση στον τομέα της εξάντλησης των ορυκτών πόρων λόγω της μεγάλης κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας (1,05 Pt). Όσο αφορά όμως το οικοσύστημα το συνολικό αποτέλεσμα είναι θετικό λόγω του pellet που παράγεται κατά το στάδιο της εκχύλισης (-0,58 Pt). Βλέπουμε επίσης ότι στα στάδια της εκχύλισης και της μετατροπής σε βιοντίζελ οι αρνητικές συνέπειες που εμφανίζονται στον τομέα των ορυκτών πόρων είναι εντονότερες σε σχέση με αυτές που αφορούν την ανθρώπινη υγεία. Τέλος συγκρίνοντας τα διάφορα στάδια μεταξύ τους προκύπτει ότι η μεγαλύτερη επιβάρυνση προέρχεται από το στάδιο της καλλιέργειας της άλγης (1,48 Pt).

Πίνακας 16: Περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις ανά κατηγορία βλάβης για τα διαφορετικά στάδια της καλλιέργειας του *Spirulina Platensis* σε ανοιχτή δεξαμενή.

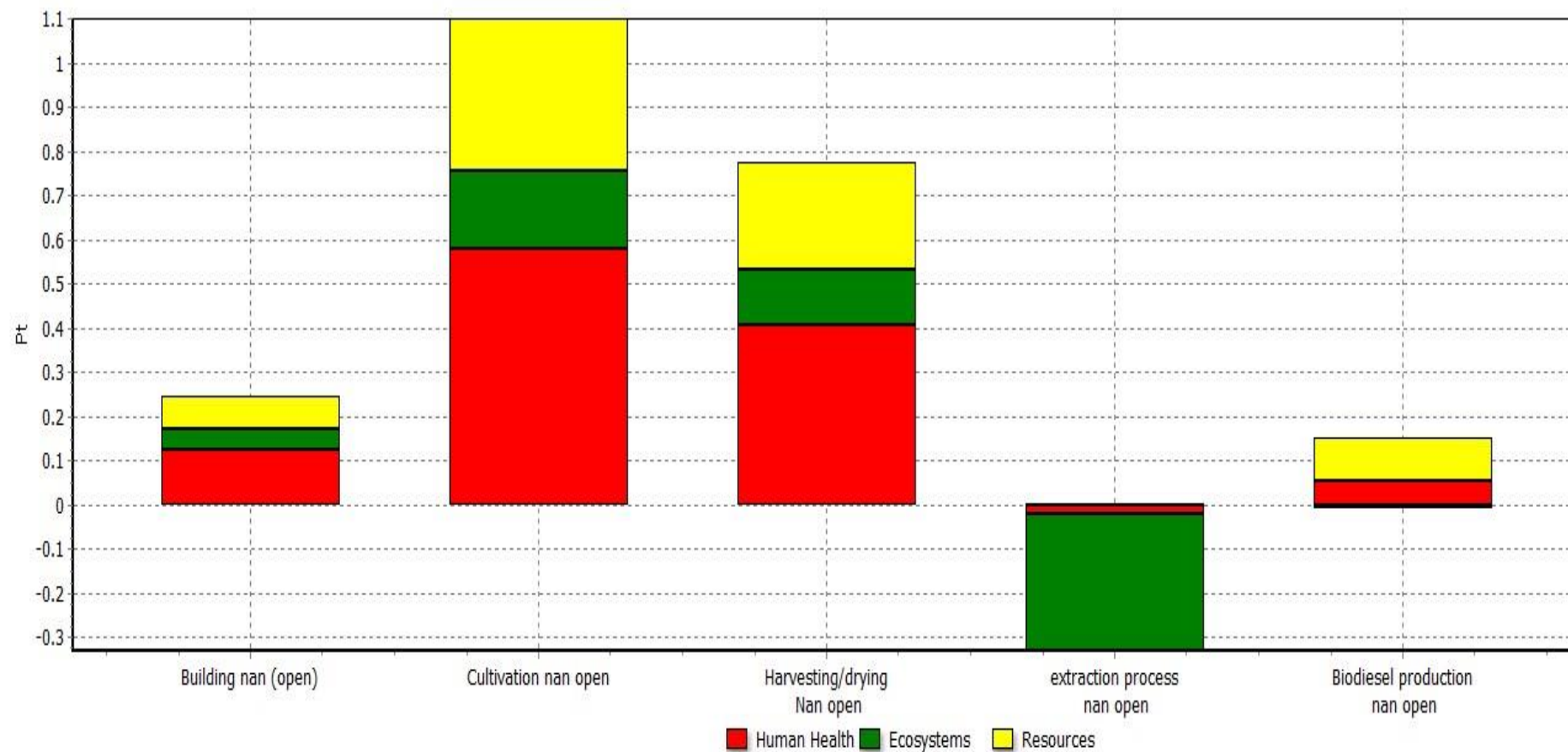
Κατηγορία Βλάβης	Μονάδα	Συνολικά	Κατασκευαστικά	Καλλιέργεια	Συγκομιδή	Εκχύλιση	Μετατροπή σε βιοντίζελ
Total	Pt	2,03	0,33	1,48	1,04	-0,95	0,14
Human Health	Pt	1,58	0,17	0,78	0,55	0,03	0,06
Ecosystems	Pt	-0,59	0,06	0,24	0,17	-1,05	-0,01
Resources	Pt	1,05	0,10	0,46	0,33	0,06	0,10

4.2.2 Καλλιέργεια του είδους *Nannochloropsis* Sp. σε ανοιχτή δεξαμενή



Διάγραμμα 5: Διάγραμμα ροής ποσοστού περιβαλλοντικών φορτίων ανά κιλό παραγόμενου βιοντίζελ για την καλλιέργεια του είδους *Nannochloropsis* Sp. σε ανοιχτή δεξαμενή.

Βλέπουμε από το παραπάνω δένδρογραμμα ότι οι πηγές επιβάρυνσης για την καλλιέργεια του είδους *Nannochloropsis* Sp. είναι παρόμοιες με αυτές της πρώτης καλλιέργειας. Συγκεκριμένα η ενέργεια για την λειτουργία του paddlewheel αποτελεί το 55,8% και η κατανάλωση των λαμπτήρων ξήρανσης το 35,2% της συνολικής επιβάρυνσης. Αυτό είναι λογικό καθώς οι ποσότητες που επεξεργαζόμαστε είναι ακριβώς οι ίδιες μέχρι το τέλος της διαδικασίας συγκομιδής και ξήρανσης. Επίσης οι ώρες λειτουργίας των διαφόρων διαδικασιών είναι ακριβώς οι ίδιες οπότε και οι ετήσιες καταναλώσεις ενέργειας δεν αλλάζουν. Η βασική αλλαγή αφορά τις ποσότητες εξανίου, μεθανόλης και υδροξειδίου του καλίου που χρησιμοποιούνται. Βέβαια η κατανάλωση ενέργειας στα στάδια της εκχύλισης και της μετατροπής του ελαίου αλλάζει σε μικρό βαθμό, καθώς οι ποσότητες που επεξεργαζόμαστε διαφοροποιούνται σε σχέση με το πρώτο σενάριο. Για παράδειγμα το εξάνιο στο πρώτο σενάριο (Βλέπε διάγραμμα σελ. 65) αποτελούσε το 4,11%, ενώ τώρα αποτελεί μόνο το 1,58%. Τέλος λόγω της μείωσης της επεξεργαζόμενης ξηρής βιομάζας το παραγόμενο pellet μειώθηκε σημαντικά. Συνεπώς και η ελάφρυνση της συνολικής επιβάρυνσης εξαιτίας του ελαττώθηκε από 60,7% (Βλέπε διάγραμμα σελ. 67) σε μόλις 18,3%.



Analyzing 1 p 'nanochlo platensis (open) process';
 Method: ReCiPe Endpoint (H) V1.10 / Europe ReCiPe H/A / Single score

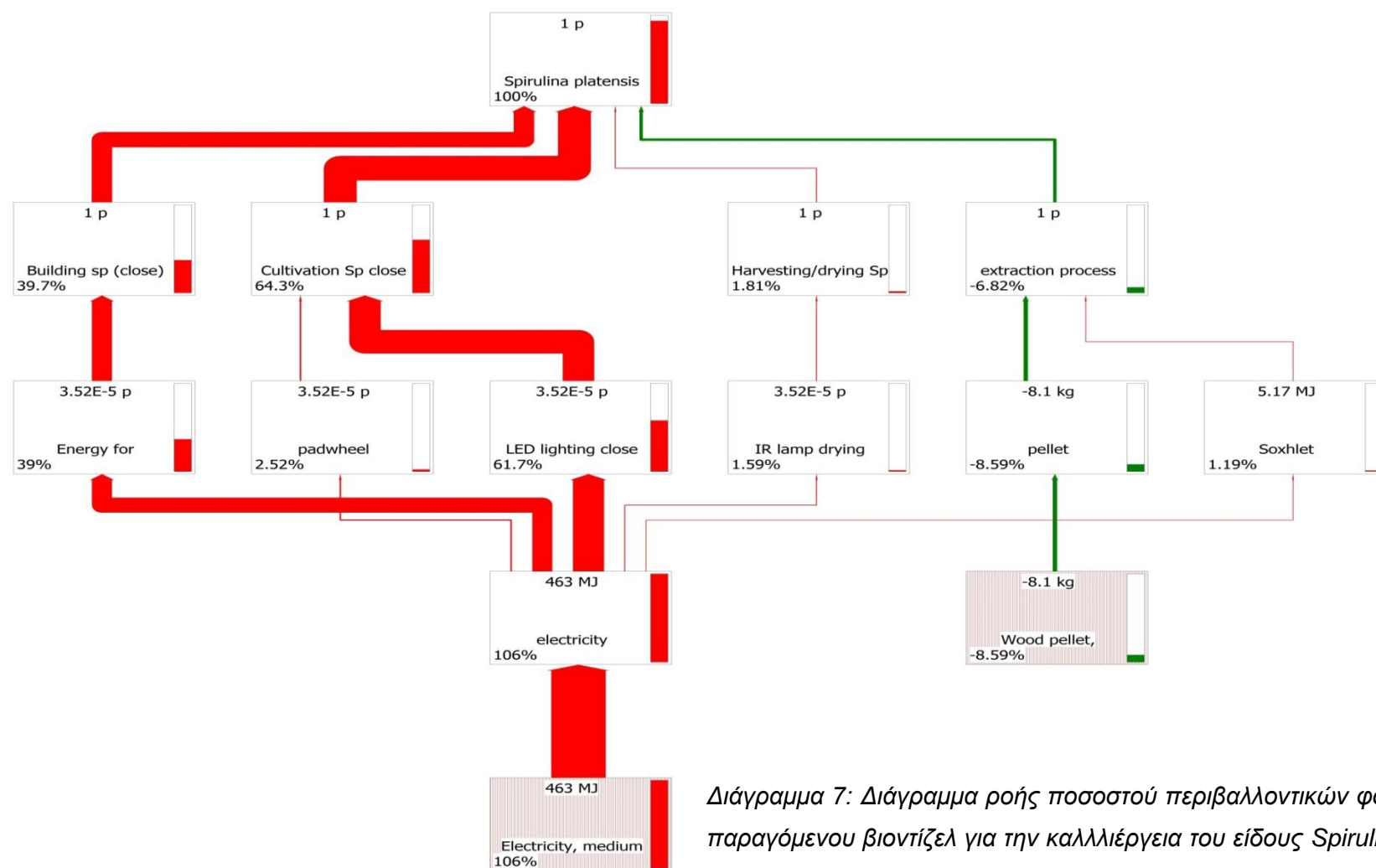
Διάγραμμα 6: Κατανομή περιβαλλοντικών επιβαρύνσεων σε κατηγορίες βλάβης ανά κιλό παραγόμενου βιοντίζελ για την καλλιέργεια του είδους *Nannochloropsis Sp.* σε ανοιχτή δεξαμενή.

Όπως και στην καλλιέργεια του είδους *Spirulina Platensis*, έτσι και εδώ τα ποσοστά των επιβαρύνσεων είναι παρόμοια και αφορούν τους ίδιους τομείς, δηλαδή ανθρώπινη υγεία, εξάντληση φυσικών πόρων και οικοσύστημα. Αν και παρατηρείται ότι η συνολική επιβάρυνση είναι λίγο μικρότερη σε σχέση με το πρώτο είδος λόγω της μεγαλύτερης ποσότητας τελικού βιοντίζελ, τα αντίστοιχα θετικά οφέλη στο στάδιο της εκχύλισης είναι πολύ μικρότερα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι κατά την παραγωγή του συγκεκριμένου είδους η ποσότητα του pellet που παράγεται είναι λιγότερη από την μισή σε σχέση με το πρώτο είδος. Επιπλέον είναι αξιοσημείωτο ότι στο συγκεκριμένο σενάριο το στάδιο αυτό επιδρά θετικά και στην ανθρώπινη υγεία εκτός από το οικοσύστημα σε πολύ μικρό βαθμό φυσικά (0,02 Pt).

Πίνακας 17: Περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις ανά κατηγορία βλάβης για τα διαφορετικά στάδια της καλλιέργειας του *Nannochloropsis Sp.* σε ανοιχτή δεξαμενή.

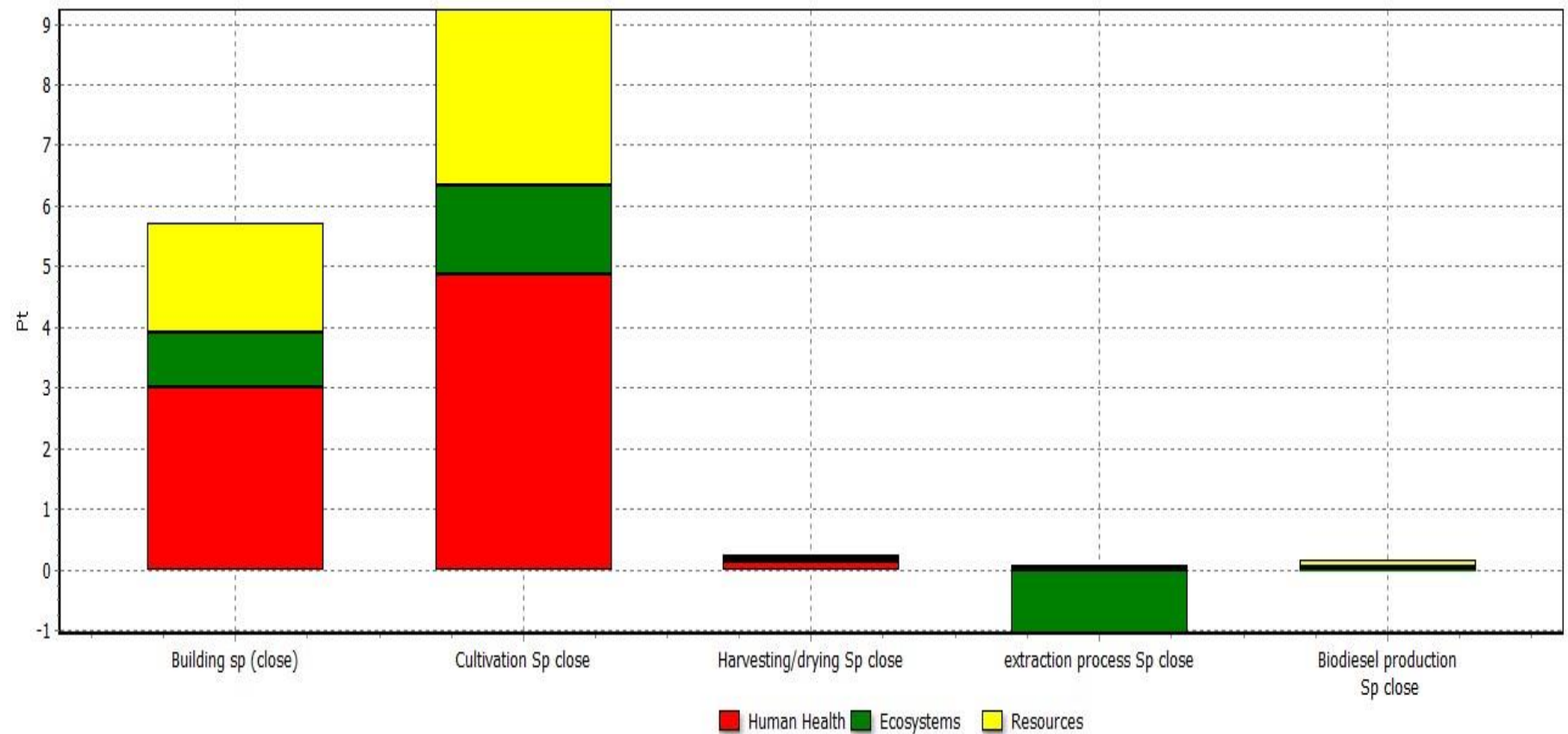
Κατηγορία Βλάβης	Μονάδα	Συνολικά	Κατασκευαστικά	Καλλιέργεια	Συγκομιδή	Εκχύλιση	Μετατροπή σε βιοντίζελ
Total	Pt	1,94	0,25	1,10	0,77	-0,32	0,14
Human Health	Pt	1,15	0,13	0,58	0,41	-0,02	0,06
Ecosystems	Pt	0,03	0,05	0,18	0,12	-0,31	-0,01
Resources	Pt	0,77	0,07	0,35	0,24	0,00	0,10

4.2.3 Καλλιέργεια του είδους *Spirulina Platensis* σε κλειστή δεξαμενή



Διάγραμμα 7: Διάγραμμα ροής ποσοστού περιβαλλοντικών φορτίων ανά κιλό παραγόμενου βιοντίζελ για την καλλιέργεια του είδους *Spirulina Platensis* σε κλειστή δεξαμενή.

Παρατηρούμε από το παραπάνω δένδρογραμμα ότι σε αντίθεση με τα προηγούμενα σενάρια στην καλλιέργεια του είδους *Spirulina Platensis* σε κλειστή δεξαμενή οι καταναλώσεις για την ανάδευση της δεξαμενής και για την ξήρανση της άλγης αποτελούν μόνο το 2,52% και 1,59% της συνολικής επιβάρυνσης αντίστοιχα. Αντιθέτως οι κύριες επιβαρύνσεις προέρχονται από την λειτουργία των λαμπτήρων LED εντός των δεξαμενών (61,7%) αλλά και από την απαραίτητη ενέργεια που καταναλώνεται για διατήρηση της θερμοκρασίας στα επιθυμητά επίπεδα (39%). Αξίζει να σημειωθεί ότι πολλά στάδια δεν εμφανίζονται όπως στα προηγούμενα σενάρια, καθώς η συμμετοχή τους στην συνολική επιβάρυνση είναι κάτω από 1%. Τέλος συμπεραίνουμε ότι παρόλο που η ποσότητα του pellet που παράγεται ανά μονάδα βιοντίζελ είναι η ίδια με εκείνη που παράγεται και στην ανοιχτή δεξαμενή, η συνεισφορά αυτού στην μείωση της συνολικής επιβάρυνσης πλέον δεν ξεπερνάει το 8,59%, την στιγμή που στο πρώτο σενάριο έφτανε το 60,7%.



Analyzing 1 p 'Spirulina platensis (close) process';
 Method: ReCiPe Endpoint (H) V1.10 / Europe ReCiPe H/A / Single score

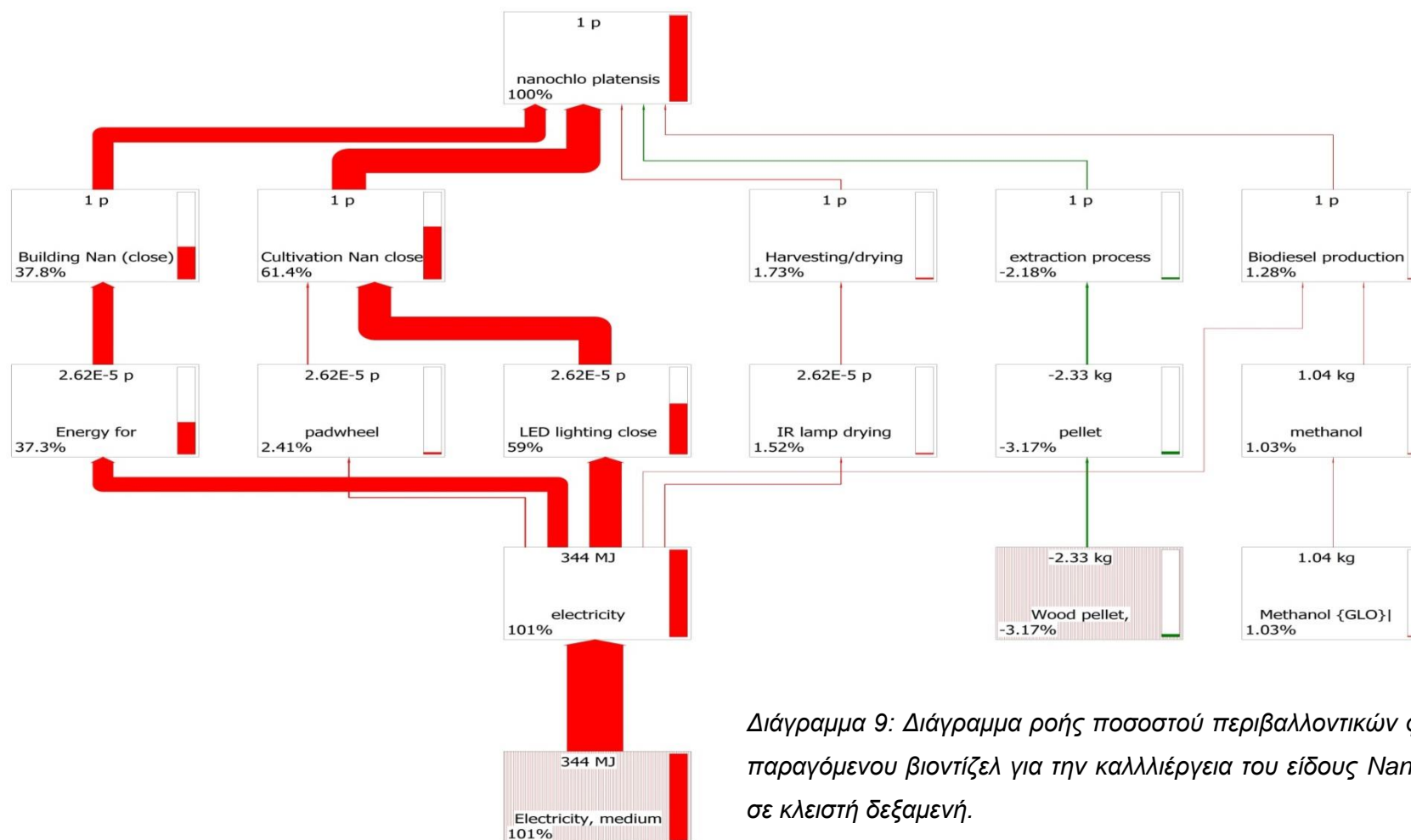
Διάγραμμα 8: Κατανομή περιβαλλοντικών επιβαρύνσεων σε κατηγορίες βλάβης ανά κιλό παραγόμενου βιοντίζελ για την καλλιέργεια του είδους *Spirulina Platensis* σε κλειστή δεξαμενή.

Σύμφωνα με το παραπάνω διάγραμμα οι κύριες αρνητικές συνέπειες συνεχίζουν να αφορούν κατά κύρια βάση την ανθρώπινη υγεία και εν συνεχεία την εξάντληση των φυσικών πόρων. Παρατηρούμε ότι η κύρια επιβάρυνση στην ανθρώπινη υγεία (7,86 Pt) προέρχεται από το κατασκευαστικό στάδιο και από το στάδιο της καλλιέργειας. Αντίθετα στα προηγούμενα σενάρια η μεγαλύτερη επιβάρυνση προερχόταν από το στάδιο της καλλιέργειας και από το στάδιο της συγκομιδής/ξήρανσης. Αυτή η διαφοροποίηση οφείλεται στο γεγονός ότι στο κατασκευαστικό στάδιο και στο στάδιο της καλλιέργειας προστέθηκαν οι διεργασίες για την διατήρηση της θερμοκρασίας και η λειτουργία των λαμπτήρων LED αντίστοιχα. Τέλος γίνεται αντιληπτό ότι η επίδραση των υπόλοιπων σταδίων στο συγκεκριμένο σενάριο είναι αμελητέα, ενώ μάλιστα η συνολική τους επιβάρυνση είναι και αρνητική (- 0,58 Pt).

Πίνακας 18: Περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις ανά κατηγορία βλάβης για τα διαφορετικά στάδια της καλλιέργειας του *Spirulina Platensis* σε κλειστή δεξαμενή.

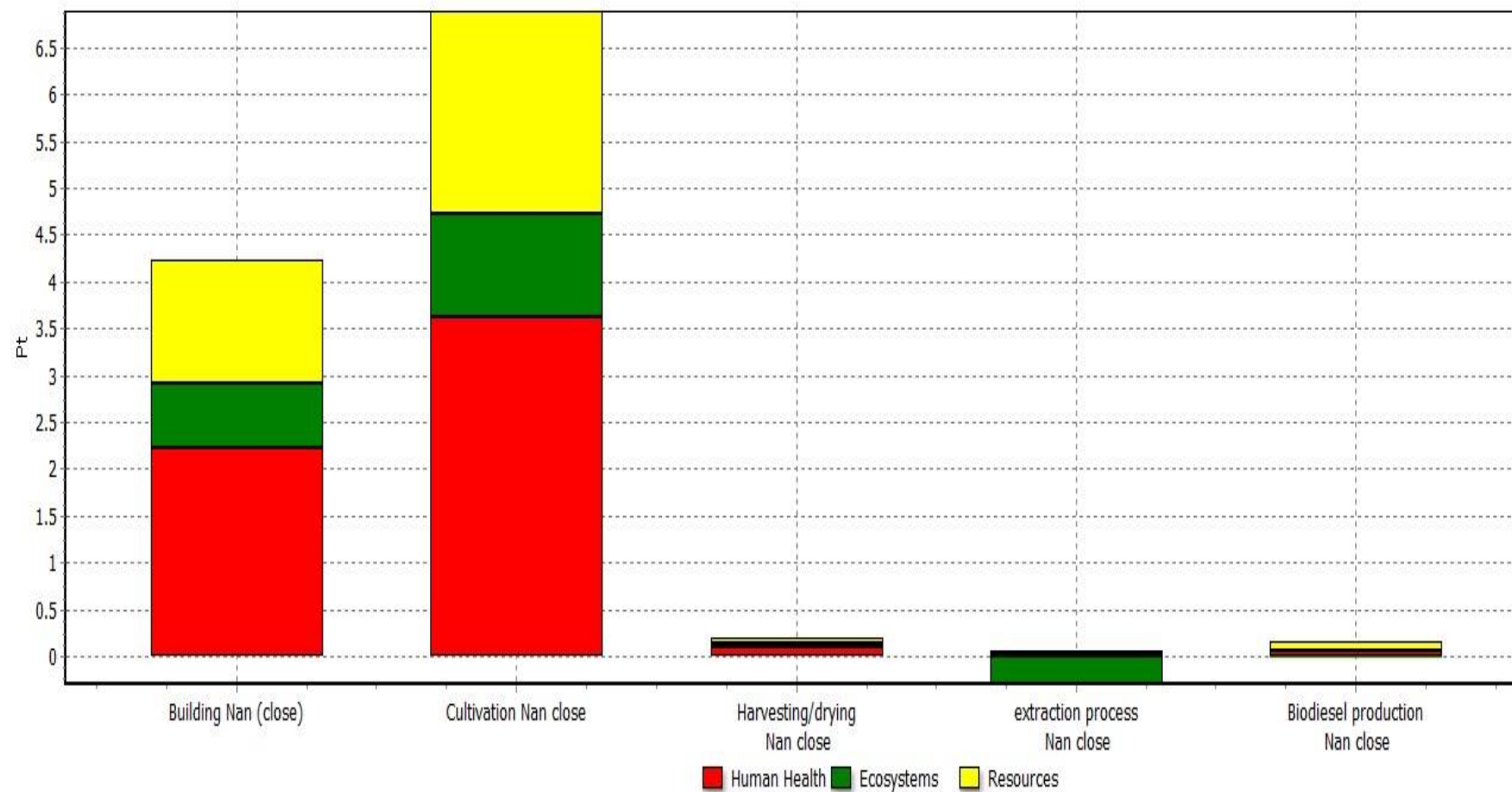
Κατηγορία Βλάβης	Μονάδα	Συνολικά	Κατασκευαστικά	Καλλιέργεια	Συγκομιδή	Εκχύλιση	Μετατροπή σε βιοντίζελ
Total	Pt	14,38	5,71	9,24	0,26	-0,98	0,14
Human Health	Pt	8,08	3,00	4,86	0,14	0,02	0,06
Ecosystems	Pt	1,37	0,92	1,48	0,04	-1,05	-0,01
Resources	Pt	4,93	1,79	2,90	0,08	0,05	0,10

4.2.4 Καλλιέργεια του είδους *Nannochloropsis* Sp. σε κλειστή δεξαμενή



Διάγραμμα 9: Διάγραμμα ροής ποσοστού περιβαλλοντικών φορτίων ανά κιλό παραγόμενου βιοντίζελ για την καλλιέργεια του είδους *Nannochloropsis* Sp. σε κλειστή δεξαμενή.

Παρατηρούμε από το παραπάνω δένδρογραμμα ότι παρόμοια και με το άλλο είδος που καλλιεργήθηκε σε κλειστή δεξαμενή έτσι και με αυτό οι βασικές επιβαρύνσεις της καλλιέργειας προέρχονται από την λειτουργία των λαμπτήρων και από τις ενεργειακές απαιτήσεις για διατήρηση της θερμοκρασίας εντός των θερμοκηπίων. Οι υπόλοιπες λειτουργίες είναι συγκριτικά ελάχιστα επιβαρυντικές. Η μόνη διαφορά που εντοπίζεται σε σχέση με το είδος *Spirulina Platensis* είναι ότι στο συγκεκριμένο σενάριο η επιβάρυνση λόγω της χρήσης μεθανόλης ξεπερνάει το 1% (συγκεκριμένα 1,03%) και εμφανίζεται στο δένδρογραμμα.



Analyzing 1 p 'nanochlo platensis (close) process';
 Method: ReCiPe Endpoint (H) V1.10 / Europe ReCiPe H/A / Single score

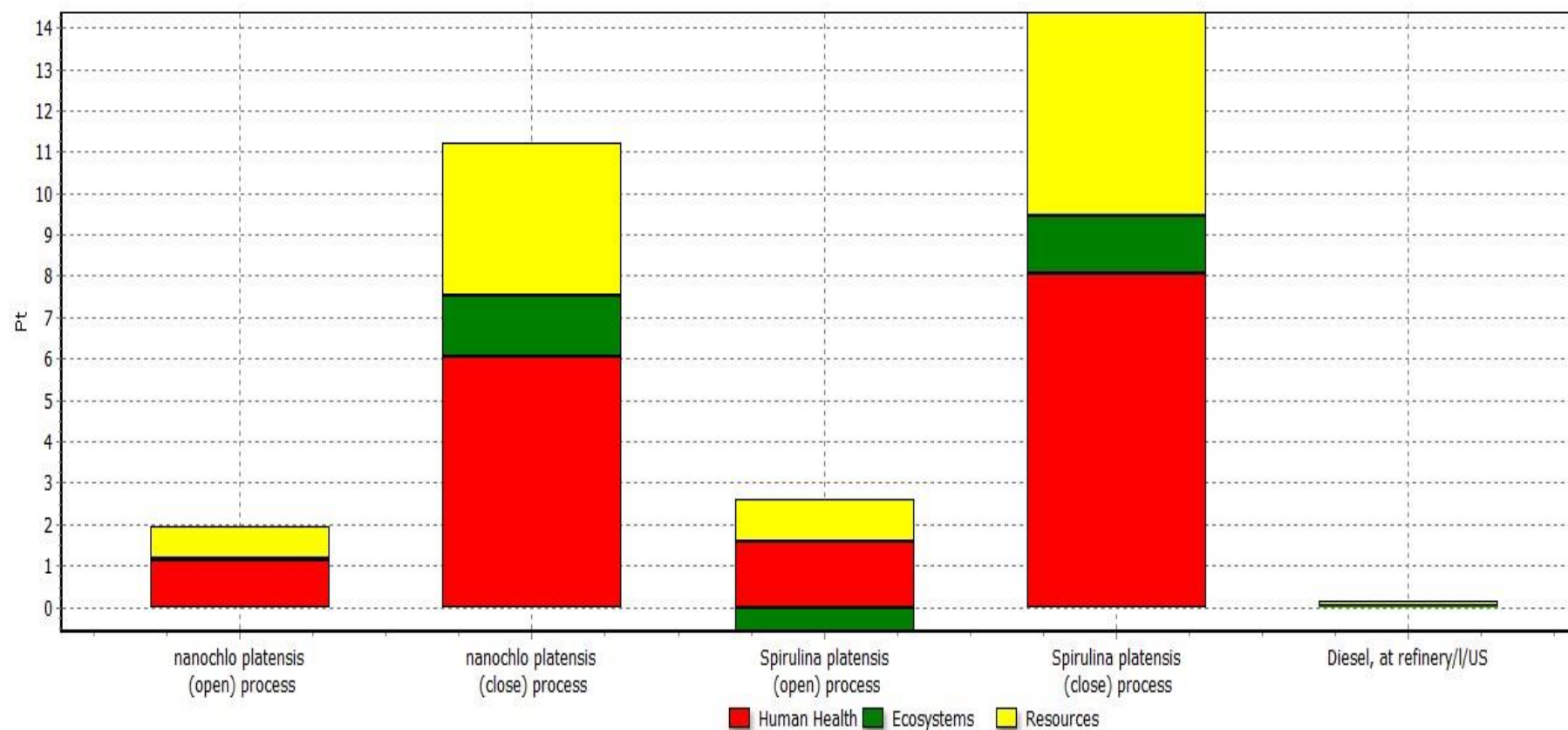
Διάγραμμα 10: Κατανομή περιβαλλοντικών επιβαρύνσεων σε κατηγορίες βλάβης ανά κιλό παραγόμενου βιοντίζελ για την καλλιέργεια του είδους *Nannochloropsis Sp.* σε κλειστή δεξαμενή.

Είναι προφανές από το παραπάνω διάγραμμα ότι η καλλιέργεια του είδους *Nannochloropsis* Sp. έχει μεγάλη επιβάρυνση στην ανθρώπινη υγεία, στην κατανάλωση των ορυκτών πόρων, αλλά και στο οικοσύστημα. Συγκεκριμένα η επιβάρυνση στην ανθρώπινη υγεία είναι 6,04 Pt η οποία προέρχεται κατά κύριο λόγο από το κατασκευαστικό στάδιο και από το στάδιο της καλλιέργειας (2,23 Pt και 3,63 Pt αντίστοιχα). Οι υπόλοιπες διαδικασίες έχουν πολύ μικρή συμμετοχή στα επιβαρυντικά φορτία, καθώς το συνολικό άθροισμα τους φτάνει μόλις τα 0,09 Pt. Τέλος παρατηρούμε ότι στο συγκεκριμένο σενάριο το στάδιο της εκχύλισης έχει την μικρότερη θετική επίδραση στο οικοσύστημα σε σχέση με τις υπόλοιπες καλλιέργειες (- 0,3 Pt).

Πίνακας 19: Περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις ανά κατηγορία βλάβης για τα διαφορετικά στάδια της καλλιέργειας του *Nannochloropsis* Sp σε κλειστή δεξαμενή.

Κατηγορία Βλάβης	Μονάδα	Συνολικά	Κατασκευαστικά	Καλλιέργεια	Συγκομιδή	Εκχύλιση	Μετατροπή σε βιοντίζελ
Total	Pt	11,22	4,24	6,89	0,19	-0,24	0,14
Human Health	Pt	6,04	2,23	3,63	0,10	0,02	0,06
Ecosystems	Pt	1,51	0,68	1,10	0,03	-0,30	-0,01
Resources	Pt	3,68	1,33	2,16	0,06	0,03	0,10

4.3 Σύγκριση περιβαλλοντικών επιπτώσεων των τεσσάρων καλλιεργειών με το συμβατικό ντίζελ



Comparing product stages;
Method: ReCiPe Endpoint (H) V1.10 / Europe ReCiPe H/A / Single score

Διάγραμμα 11: Σύγκριση περιβαλλοντικών επιβαρύνσεων ανά κιλό παραγόμενου βιοντίζελ μεταξύ των τεσσάρων καλλιεργειών και του συμβατικού ντίζελ.

Το παραπάνω διάγραμμα συγκρίνει τις περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις των τεσσάρων καλλιεργειών μεταξύ τους αλλά και με το κοινό ντίζελ. Όπως παρατηρούμε το απλό ντίζελ ασκεί πολύ λιγότερη αρνητική επίδραση στο περιβάλλον σε σχέση με τις καλλιέργειες των μικροφυκών. Οι χειρότερες περιβαλλοντικά καλλιέργειες αναδείχθηκαν οι κλειστές καλλιέργειες. Συγκεκριμένα η καλλιέργεια του είδους *Spirulina Platensis* σε κλειστή δεξαμενή είχε την μεγαλύτερη αρνητική επίδραση στην ανθρώπινη υγεία και στην κατανάλωση των πόρων (14,38 Pt και 8,08 Pt αντίστοιχα). Όσο αναφορά τον τομέα του οικοσυστήματος η μεγαλύτερη επιβάρυνση προέκυψε από την κλειστή καλλιέργεια του είδους *Nannochloropsis* Sp. (1,51 Pt). Η μόνη καλλιέργεια που είχε θετική επίδραση στον τομέα του οικοσυστήματος ήταν αυτή του είδους *Spirulina Platensis* σε ανοιχτή δεξαμενή (- 0,59 Pt). Παρόλα αυτά η μικρότερη συνολική επιβάρυνση εμφανίζεται στην ανοιχτή καλλιέργεια του είδους *Nannochloropsis* Sp. με την τιμή της να φτάνει τα 1,94 Pt. Όπως γίνεται αντιληπτό ακόμα και αυτή η τιμή φαντάζει πολύ μεγάλη σε σχέση με εκείνη του απλού ντίζελ.

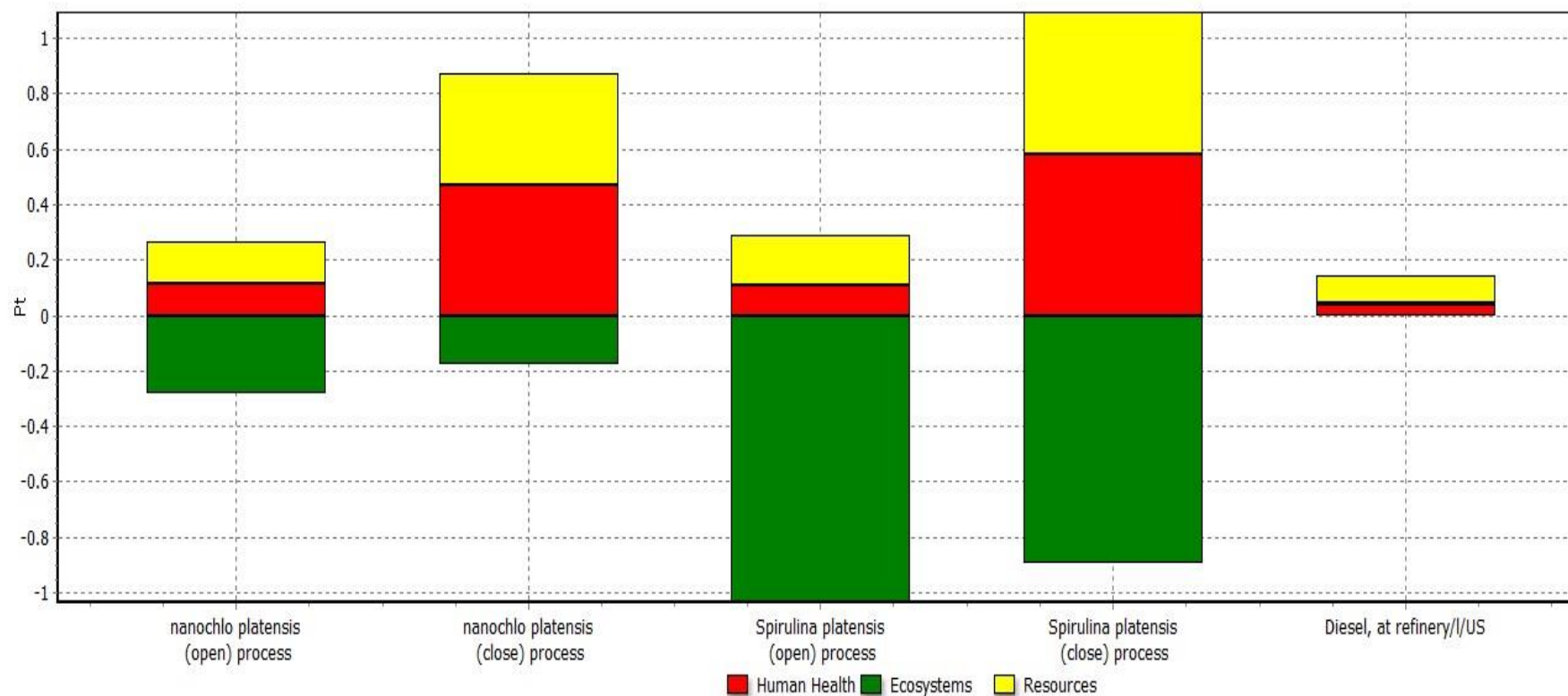
Πίνακας 20: Περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις ανά κατηγορία βλάβης για τις τέσσερις καλλιέργειες και το συμβατικό ντίζελ

Κατηγορία Βλάβης	Μονάδα	Nannochloropsis Sp. (open)	Nannochloropsis Sp. (close)	Spirulina platensis (open)	Spirulina platensis (close)	Diesel, at refinery//US
Total	Pt	1,94	11,22	2,03	14,38	0,14
Human Health	Pt	1,15	6,04	1,58	8,08	0,04
Ecosystems	Pt	0,03	1,51	-0,59	1,37	0,01
Resources	Pt	0,77	3,68	1,05	4,93	0,10

4.4 Εναλλακτικά σενάρια

Λόγω του ότι προέκυψαν μεγάλες ενεργειακές απαιτήσεις όπως αναμενόταν σε ορισμένα στάδια των καλλιεργειών, τα δύο εναλλακτικά σενάρια που εξετάσθηκαν αφορούν την προέλευση του ρεύματος. Συγκεκριμένα ως πρώτη εναλλακτική διερευνήθηκε η πιθανότητα κατανάλωσης ρεύματος που προέρχεται από φωτοβολταϊκά συστήματα. Κάτι τέτοιο είναι πιθανό για την περιοχή της Κρήτης, καθώς υπάρχει πραγματική παραγωγή του συγκεκριμένου μίγματος ρεύματος. Σαν δεύτερο σενάριο εξετάσθηκε η κατανάλωση ενεργειακού μίγματος από αιολική παραγωγή το οποίο με την σειρά του είναι επίσης εφικτό στην συγκεκριμένη γεωγραφική περιοχή.

4.4.1 Σύγκριση περιβαλλοντικών επιπτώσεων των τεσσάρων καλλιεργειών με το συμβατικό ντίζελ (μείγμα ρεύματος από φωτοβολταϊκά συστήματα).



Comparing product stages;
Method: ReCiPe Endpoint (H) V1.10 / Europe ReCiPe H/A / Single score

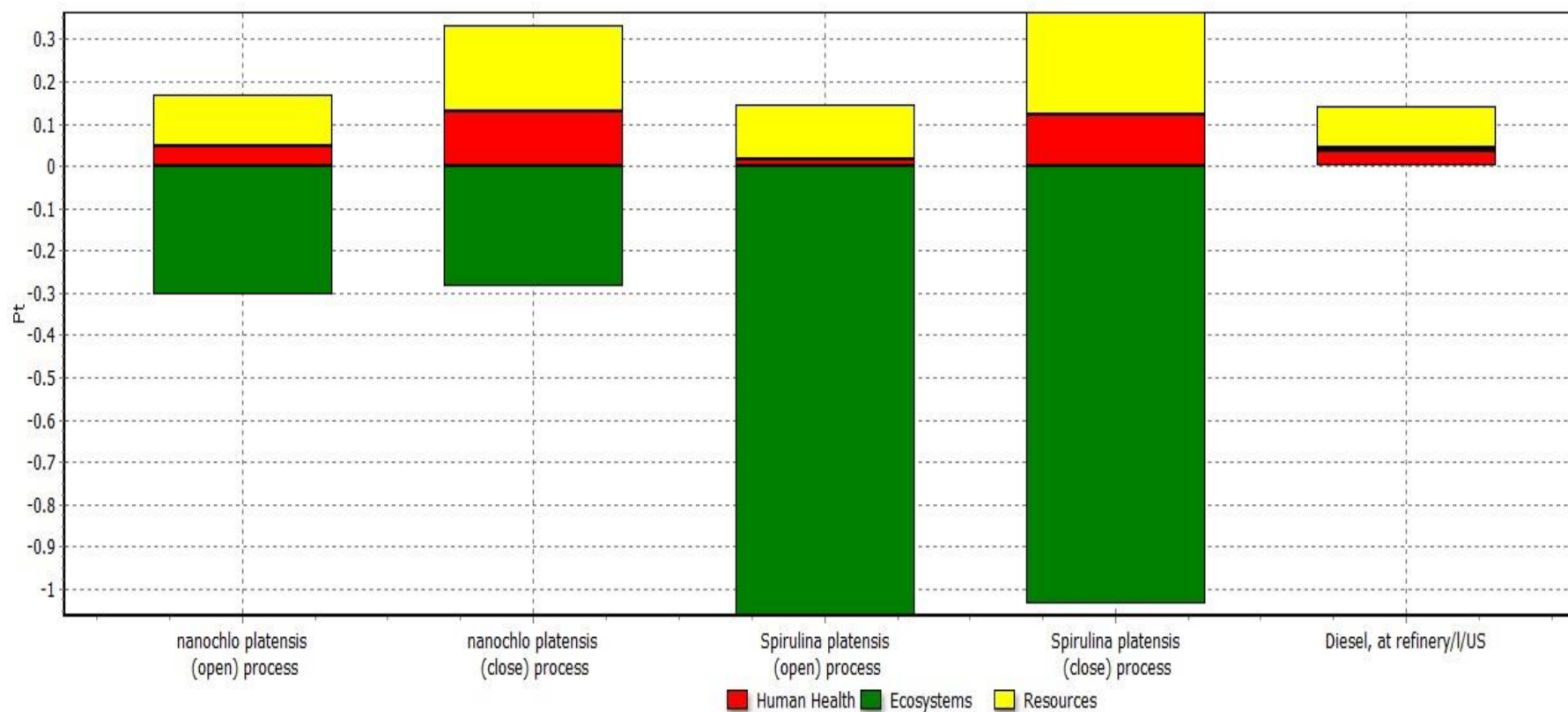
Διάγραμμα 12: Σύγκριση περιβαλλοντικών επιβαρύνσεων ανά κιλό παραγόμενου βιοντίζελ μεταξύ των τεσσάρων καλλιεργειών και του συμβατικού ντίζελ με χρήση ρεύματος που προέρχεται από φωτοβολταϊκά συστήματα.

Όπως παρατηρούμε από το παραπάνω διάγραμμα για το σενάριο χρήσης ρεύματος από φωτοβολταϊκά συστήματα οι τέσσερις καλλιέργειες συνεχίζουν να έχουν χειρότερες συνέπειες για την ανθρώπινη υγεία και για την κατανάλωση των πόρων σε σχέση με το κοινό βιοντίζελ. Επιπλέον οι διαφορές μεταξύ τους είναι παρόμοιες με αυτές που προέκυψαν και κατά την χρήση κοινού ρεύματος. Παρόλα αυτά και για τις τέσσερις καλλιέργειες στο συγκεκριμένο εναλλακτικό σενάριο προκύπτει μεγάλη ελάφρυνση στον τομέα του οικοσυστήματος. Αυτό οδηγεί στην μείωση των συνολικών επιβαρύνσεων για όλες τις καλλιέργειες. Τελικά τα συνολικά αποτελέσματα που προκύπτουν δείχνουν ότι οι δύο ανοιχτές καλλιέργειες έχουν σε συνολικό βαθμό η κάθε μια θετική επίδραση στο περιβάλλον και συνεπώς καλύτερο αποτέλεσμα από το απλό ντίζελ. Συγκεκριμένα η καλλιέργεια του είδους *Spirulina Platensis* σε ανοιχτή δεξαμενή παρουσιάζει τα καλύτερα αποτελέσματα (- 0,75 Pt). Αντίθετα οι δύο κλειστές καλλιέργειες αν και παρουσίασαν βελτίωση, παρέμειναν περιβαλλοντικά ασύμφωρες σε σχέση το κοινό ντίζελ.

Πίνακας 21: Περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις ανά κατηγορία βλάβης για τις τέσσερις καλλιέργειες και το συμβατικό ντίζελ (μείγμα ρεύματος από φωτοβολταϊκά συστήματα)

Κατηγορία Βλάβης	Μονάδα	Nannochloropsis Sp.(open)	Nannochloropsis Sp.(close)	Spirulina platensis (open)	Spirulina platensis (close)	Diesel,at refinery//US
Total	Pt	-0,02	0,69	-0,75	0,20	0,14
Human Health	Pt	0,11	0,47	0,11	0,58	0,04
Ecosystems	Pt	-0,28	-0,18	-1,03	-0,89	0,01
Resources	Pt	0,16	0,41	0,18	0,52	0,10

4.4.2 Σύγκριση περιβαλλοντικών επιπτώσεων των τεσσάρων καλλιεργειών με το συμβατικό ντίζελ (μείγμα ρεύματος από αιολικά συστήματα).



Comparing product stages;
Method: ReCiPe Endpoint (H) V1.10 / Europe ReCiPe H/A / Single score

Διάγραμμα 13: Σύγκριση περιβαλλοντικών επιβαρύνσεων ανά κιλό παραγόμενου βιοντίζελ μεταξύ των τεσσάρων καλλιεργειών και του συμβατικού ντίζελ με χρήση ρεύματος που προέρχεται από αιολικά συστήματα.

Γίνεται αντιληπτό από το παραπάνω διάγραμμα ότι η χρήση ρεύματος από αιολική ενέργεια βελτιώνει σε μεγάλο βαθμό τα αποτελέσματα. Όπως παρατηρούμε και οι τέσσερις καλλιέργειες εμφανίζουν πλέον λιγότερες συνολικές επιβαρύνσεις σε σχέση με το κοινό ντίζελ. Η καλλιέργεια του είδους *Spirulina Platensis* σε ανοιχτή και κλειστή δεξαμενή εμφανίζουν τα καλύτερα αποτελέσματα (-0,92 Pt και -0,67 Pt αντίστοιχα). Αντιθέτως στον τομέα της ανθρώπινης υγείας η μόνη καλλιέργεια που παρατηρείται μικρότερη επιβάρυνση σε σχέση με το απλό ντίζελ είναι εκείνη του είδους *Spirulina Platensis* σε ανοιχτή δεξαμενή (0,02 Pt έναντι 0,04 Pt), ενώ στον τομέα της κατανάλωσης πόρων και οι τέσσερις καλλιέργειες παρουσιάζουν λίγο μεγαλύτερες επιβαρύνσεις από το κοινό ντίζελ.

Πίνακας 22: Περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις ανά κατηγορία βλάβης για τις τέσσερις καλλιέργειες και το συμβατικό ντίζελ (μείγμα ρεύματος από αιολικά συστήματα)

Κατηγορία Βλάβης	Μονάδα	Nannochloropsis Sp.(open)	Nannochloropsis Sp.(close)	Spirulina platensis (open)	Spirulina platensis (close)	Diesel,at refinery/I/US
Total	Pt	-0,14	0,05	-0,92	-0,67	0,14
Human Health	Pt	0,05	0,13	0,02	0,12	0,04
Ecosystems	Pt	-0,30	-0,28	-1,06	-1,04	0,01
Resources	Pt	0,12	0,20	0,13	0,24	0,10

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5:ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ/ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

5.1 Σύγκριση των τεσσάρων καλλιεργειών

Όπως παρατηρήσαμε από τα διαγράμματα και οι τέσσερις καλλιέργειες είναι αρκετά ενεργοβόρες και παρουσιάζουν αρκετές επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία, στην κατανάλωση διαφόρων πηγών αλλά και στο οικοσύστημα. Είναι γεγονός ότι τα κλειστά συστήματα είναι εξαιρετικά ασύμφορα, καθώς η ενεργειακές απαιτήσεις για την χρήση λαμπτήρων καθόλα τα διάρκεια της ημέρας αλλά και για τη διατήρηση των επιθυμητών θερμοκρασιακών ορίων είναι τεράστιες. Συνεπώς απαιτείται περεταίρω διερεύνηση τους για εναλλακτικές λύσεις στους δύο αυτούς τομείς, οι οποίες θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε πολύ πιο φιλικά αποτελέσματα για το περιβάλλον.

Όσο αναφορά τα ανοιχτά συστήματα καλλιέργειας καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι παρά τα ευνοϊκότερα αποτελέσματα σε σχέση με αυτά των κλειστών δεξαμενών, παραμένουν αρκετά πιο επιβαρυντικά σε σχέση με την χρήση του κοινού ντίζελ. Αυτό καθιστά τις καλλιέργειες μη βιώσιμες με βάση τα υπάρχοντα δεδομένα. Το κύριο μειονέκτημα των καλλιεργειών βρίσκεται στις υψηλές καταναλώσεις ενέργειας κατά το στάδιο της ξήρανσης τους αλλά και της ανάδευσης τους εντός των δεξαμενών. Συνεπώς είναι απαραίτητη η εξέλιξη στους συγκεκριμένους τομείς και ανεύρεση νέων μεθόδων με λιγότερες ενεργειακές απαιτήσεις έτσι ώστε να καταστεί το βιοντίζελ από άληγη περιβαλλοντικά φιλικότερο σε σχέση με το κοινό ντίζελ.

5.2 Σύγκριση των εναλλακτικών σεναρίων

Τα εναλλακτικά σενάρια που εξετάσθηκαν έδειξαν ότι η χρήση αιολικής ενέργειας έχει καλύτερη επίδραση στα τελικά αποτελέσματα σε σχέση με την κατανάλωση ενέργειας που προέρχεται από φωτοβολταϊκά συστήματα. Και στα δύο αυτά σενάρια οι μικρότερες επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και στα αποθέματα ορυκτών πόρων εμφανίστηκαν στις ανοιχτές καλλιέργειες. Παρόλα αυτά στο σενάριο χρήσης αιολικής ενέργειας η κλειστή καλλιέργεια του είδους *Spirulina Platensis* παρουσίασε ευνοϊκότερα συνολικά αποτελέσματα σε σχέση με την καλλιέργεια του είδους *Nannochloropsis* Sp. σε ανοιχτή δεξαμενή λόγω της μεγάλης θετικής επίδρασης της στο οικοσύστημα.

Συμπερασματικά οι τέσσερις καλλιέργειες με χρήση ρεύματος που προέρχεται από αιολική ενέργεια, αλλά και η καλλιέργεια του είδους *Spirulina Platensis* σε ανοιχτή δεξαμενή με μίγμα ρεύματος που προέρχεται από φωτοβολταϊκά είναι οι μόνες που παρουσιάζουν συνολικά φιλικότερες επιδράσεις στο περιβάλλον σε σχέση με το συμβατικό ντίζελ. Εξ αυτών το βέλτιστο σενάριο αποτελεί η καλλιέργεια του είδους *Spirulina Platensis* σε ανοιχτή δεξαμενή με κατανάλωση ρεύματος αιολικής παραγωγής.

5.3 Προτάσεις

Οι συνολικές επιβαρύνσεις των ανοιχτών καλλιεργειών όπως αναφέραμε μπορούν να μειωθούν με την εξέλιξη νέων μεθόδων ξήρανσης και ανάδευσης των μικροφυκών οι οποίες θα έχουν μικρότερες ενεργειακές απαιτήσεις και θα καταστήσουν την διαδικασία περιβαλλοντικά βιώσιμη στο μέλλον. Είναι γεγονός ότι με τις παρούσες συνθήκες η καλλιέργεια των μικροφυκών για παραγωγή

βιοντίζελ είναι αδύνατη. Με την πρόοδο της τεχνολογίας όμως είναι σίγουρο ότι θα υπάρξουν τρόποι βελτίωσης της διαδικασίας παραγωγής.

Όσο αναφορά τα σενάρια των κλειστών δεξαμενών οι ενεργειακές απαιτήσεις θα μπορούσαν να μειωθούν σημαντικά με την χρήση εναλλακτικών μεθόδων για διατήρηση της θερμοκρασίας στα επιθυμητά επίπεδα, όπως για παράδειγμα μόνωση των κλειστών δεξαμενών με υλικά υψηλής θερμομόνωσης τα οποία μπορεί να επηρεάσουν άλλους παράγοντες αλλά θα ελαχιστοποιήσουν την δαπάνη ενέργειας για ρύθμιση της θερμοκρασίας. Επίσης παρατηρήσαμε μεγάλες καταναλώσεις από τους λαμπτήρες φωτισμού της εγκατάστασης οι οποίες ίσως μειωθούν μέσω δύο βασικών μεθόδων.

1. Εξέλιξη της τεχνολογίας και ανεύρεση νέων λαμπτήρων με μικρότερες καταναλώσεις.
2. Βελτιστοποίηση του μοντέλου παραγωγής της άλγης με στόχο τον προσδιορισμό του ικανοποιητικότερου συνδυασμού παραγωγής και κατανάλωσης.

Η διερεύνηση των προαναφερθέντων εναλλακτικών σεναρίων θα αποτελούσε ιδανικό αντικείμενο για περεταίρω μελέτη και διερεύνηση. Επιπλέον θα ήταν ιδιαίτερα σημαντικό να μελετηθούν διαφορετικά είδη άλγης τα οποία ίσως δώσουν καλύτερα αποτελέσματα, αλλά και διαφορετικές μέθοδοι παραγωγής και καλλιέργειας της άλγης. Είναι γεγονός ότι αποτελεί έναν τομέα που αναπτύσσεται και εξελίσσεται συνεχώς, συνεπώς υπάρχουν πολλές μέθοδοι οι οποίες αξίζει να διερευνηθούν όσο αναφορά τις περιβαλλοντικές τους επιπτώσεις.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Sheehan et al., 1998a, “A look back at the U.S department of Energy’s Aquatic Species program : Biodiesel from Algae, U.S. DOE
2. Ayhan Demirbas, 2007, “Importance of biodiesel as transportation fuel”, Energy Policy, Volume 35, Issue 9, Pages 4661–4670
3. Fangrui Ma., 1999, “Biodiesel Production: A review”, Bioresource Technology, Volume 70, Issue 1, Pages 1–15
4. Tsukada et al., 1977, “Mass culture of chlorella in Asian countries”, Biological Solar Energy Conversion, Pages 363-365
5. Durand – Chastel, 1980, “Production and use of Spirulina in Mexico”, In Algal biomass production and use, Pages 51-64
6. Shih – Hsin Ho, 2011, “Perspectives on microalgal CO₂ emission mitigation system – A review”, Biotechnology Advances, Volume 29, Pages 189-198
7. Becker, 1994, “Microalgae : Biotechnology and microbiology”, Industrial Microbiology & Biotechnology, Volume 36, Pages 269-274
8. Dr. John R. Benemann, 2008, “Opportunities and challenges in alga biofuel production”
9. Michael A. Borowitzka, 1999, “Commercial production of microalgae : ponds, tanks and fermenters”, Industrial Microbiology, Volume 35, Pages 313-321
10. Leslie G. Coplin, 2012, “Sustainable Development of Algal Biofuels”
11. Shen et al., 2009, “Microalgae mass production methods”, Transactions of the ASABE, Volume 52, Pages 1275-1287

12. Van Harmelen and Oonk, 2006, "Microalgae Biofixation Processes : Applications and Potential Contributions to Greenhouse Gas Mitigation options"
13. Ademola A. Adele, 2013, "Global assessment of research and development for algae biofuel production in developing countries"
14. G. Rebitzer, 2004, "Life cycle assessment : Part 1 : Framework, goal and scope definition, inventory analysis and applications", Environmental International, Volume 30, Pages 701-720
15. Göran Finnveden, 2009, "Recent developments in Life Cycle Assessment", Journal of Environmental Management, Volume 91, Pages 1-21
16. Rebitzer, 2002, "Integrating life cycle assessment for managing costs and environmental impacts in supply chains", Cost Management in Supply Chains, Pages 127-146
17. Laurent Lardon et al., 2009, "Life cycle assessment of biodiesel production from microalgae", Environmental Science and Technology, Pages 6475-6481
18. Kyle Sander et al., 2010, "Life cycle analysis of algae biodiesel", Life Cycle Assess, Volume 15, Pages 704-714
19. H. H. Khoo et al., 2011, "Life cycle energy and CO₂ analysis of microalgae to biodiesel. Preliminary results and comparisons", Bioresource Technology, Volume 102, Pages 5800 – 5807
20. Anoop Singh et al., 2011, "A critical review of biotechnical conversion sustainability and life cycle assessment of algal biofuels", Applied Energy, Volume 88, Pages 3548-3555
21. Richmond A., 1986, "In Handbook of Microalgal Mass Culture : Technological aspects of mass cultivation"

22. Howard Passella et al., 2013, "Algae biodiesel life cycle assessment using current commercial data", Journal of Environmental Management, Volume 129, Pages 103-111
23. Chen et al., 2009, "Review of the biological and engineering aspects of algae to fuels approach", International Journal of Agricultural and Biological Engineering, Volume 2, Pages 1-30
24. Y. Chisti, 2007, "Biodiesel from microalgae", Biotechnology Advances, Volume 25, Pages 294-306
25. Rui Vogt Alves da Cruz et al., 2012, "Energy analysis of oil production from microalgae", Biomass and Bioenergy, Volume 47, Pages 418-425
26. Lin Chen et al., 2012, "Biodiesel production from algae oil high in free fatty acids by two step catalytic conversion", Bioresource Technology, Volume 111, Pages 208-214
27. Pascal Schlagermann et al., 2012, "Composition of Algal oil and its potential as biofuel", Journal of Combustion
28. PRé, various authors, 2014, "Simapro Database Manual Methods Library"
29. The European Commission's Directory of LCA services, 2007, "Tools and Database – List of Tools"
30. T.O.T.E.E 20701-3/2010
31. <https://www.desmie.gr>, last access 29/11/2015
32. <https://www.ypeka.gr>, last access 8/12/2015
33. [https://www.fao.org/Algal Production](https://www.fao.org/Algal%20Production), last access 8/1/2016
34. https://www.wikipedia.org/SMD_LED, last access 10/1/2016
35. <https://www.rotosal.gr>, last access 21/12/2015
36. <https://www.technoroi.com>, last access 21/12/2015

37. <https://www.koutsikos.com>, last access 21/12/2015