

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΙV: ΣΥΝΘΕΣΗΣ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΩΝ

Διπλωματική Εργασία: “Παραγωγή Βιοντίζελ από Μικροφύκη”

Σπουδαστής: Κόλλιας Λουκάς
Α.Μ. : 05108029

Αθήνα, Ιούνιος 2013

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

I.	ΠΕΡΙΛΗΨΗ	6
II.	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	8
III.	ΜΕΛΕΤΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΒΙΟΝΤΙΖΕΛ ΑΠΟ ΜΙΚΡΟΦΥΚΗ	11
1.	ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΑ ΜΙΚΡΟΦΥΚΗ	11
i.	Μικροφύκη και Βιοτεχνολογία	11
ii.	Γιατί μικροφύκη για την παραγωγή βιοντίζελ;	14
iii.	Γενικά Στοιχεία για την Παραγωγή Βιοντίζελ από Μικροφύκη	16
iv.	Πλεονεκτήματα της χρήσης μικροφυκών για την παραγωγή βιοντίζελ	17
v.	Ιστορική εξέλιξη της παραγωγής βιοντίζελ από μικροφύκη	17
vi.	Λιπιδιακό περιεχόμενο και παραγωγικότητα μικροφυκών	19
vii.	Στόχοι της Καλλιέργειας Μικροφυκών	22
a.	Βιοντίζελ	22
b.	Γλυκερίνη	25
c.	Λιπαρά Οξέα	25
d.	Χρήσεις της βιόμαζας των μικροφυκών	26
e.	Χρήσεις των Μικροφυκών σε Προϊόντα Υψηλής Αξίας	30
viii.	Σύγκριση των Ειδών Μικροφυκών	32
ix.	<i>Chlorella sp.</i>	35
2.	ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΩΝ ΜΙΚΡΟΦΥΚΩΝ	37
i.	Φάσεις της Κυτταρικής Ανάπτυξης	37
ii.	Είδη καλλιέργειών	38
a.	Φωτοαυτότροφη καλλιέργεια	38
b.	Ετερότροφη καλλιέργεια	39
c.	Μικτότροφη καλλιέργεια	40
d.	Φωτοετερότροφη καλλιέργεια	40
e.	Σύγκριση των Διαφόρων Ειδών Καλλιέργειας	41
3.	ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΡΟΗΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑΣ	42
i.	Εισαγωγή	42
ii.	Τυπικό Διάγραμμα Ροής	42
iii.	Αναλυτικό Διάγραμμα Ροής με Επιλογές	45
4.	ΠΡΩΤΕΣ ΎΛΕΣ & ΡΟΕΣ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑΣ	46
i.	Ηλεκτρισμός	46
ii.	Τοποθεσία	47
a.	Ηλιακή Ακτινοβολία	47
b.	Θερμοκρασία	49
c.	Νερό	51
d.	Έδαφος	52
iii.	Θρεπτικά Συστατικά	53
a.	CO ₂	54
b.	Άζωτο (N)	57
c.	Φώσφορος (P)	59
d.	Χρήση Απορροής Βιολογικού Καθαρισμού ως Πηγή Θρεπτικών Συστατικών	61

e.	Λιπάσματα	62
iv.	Είδη Μικροφυκών	64
5.	ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΕΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑΣ ΜΙΚΡΟΦΥΚΩΝ	66
i.	Ανοικτά Συστήματα (Open Ponds - Raceways)	66
ii.	Παράκτια Συστήματα	68
iii.	Κλειστά Συστήματα (Φωτοβιοαντιδραστήρες - PBR)	68
iv.	Σύγκριση Ανοικτής Λίμνης - Φωτοβιοαντιδραστήρα	71
6.	ΤΡΟΠΟΙ ΣΥΛΛΟΓΗΣ ΜΙΚΡΟΦΥΚΩΝ ΑΠΟ ΤΗΝ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ	73
i.	Εισαγωγή	73
ii.	Μαζική συλλογή (Bulk Harvesting)	74
iii.	Πάχυνση (Thickening)	74
iv.	Φυγοκέντριση (Centrifugation)	74
v.	Κροκίδωση (Flocculation)	75
a.	Αυτοκροκίδωση (Autoflocculation)	75
b.	Χημική Κροκίδωση (Chemical Flocculation)	75
c.	Βιολογικά Κροκιδωτικά (Bio-Flocculants)	77
d.	Συνδυασμένη Κροκίδωση (Combined Flocculation)	77
vi.	Ηλεκτρολυτική Διεργασία (Electrolytic Process)	78
vii.	Βαρυτική καθίζηση (Gravity Sedimentation)	78
viii.	Φιλτράρισμα & Διαλογή (Filtration & Screening)	79
ix.	Επίπλευση (Flotation)	80
a.	Επίπλευση με διαλυμένο αέρα (Dissolved Air Flotation - DAF)	81
b.	Επίπλευση με διεσπαρμένο αέρα (Dispersed Air Flotation)	81
x.	Τεχνικές Ηλεκτροφόρησης (Electrophoresis Techniques)	82
xi.	Μελλοντικές Τεχνικές Συλλογής	82
a.	Κροκίδωση Μικροφυκών με Άλλα Μικροφύκη	83
b.	Μαγνητική Διαλογή Μικροφυκών	83
c.	Χρήση Υπερήχων	84
xii.	Επισκόπηση Τεχνικών Συλλογής	84
7.	ΕΞΑΓΩΓΗ ΛΙΠΙΔΙΩΝ ΑΠΟ ΤΑ ΜΙΚΡΟΦΥΚΗ ΚΑΙ ΜΕΤΑΤΡΟΠΗ ΤΟΥΣ ΣΕ ΒΙΟΝΤΙΖΕΛ	86
i.	Εισαγωγή	86
ii.	Προεπεξεργασία των Μικροφυκών	87
a.	Απονέρωση	88
b.	Διάσπαση των Κυττάρων	90
iii.	Εξαγωγή των Λιπιδίων από τα Μικροφύκη	92
a.	Χρήση Οργανικών Διαλυτών	92
b.	Πυρόλυση	93
c.	Υγροποίηση	94
iv.	Μετεστεροποίηση	94
a.	Εισαγωγή	94
b.	Μελέτη της Αντίδρασης	95
c.	Ετερογενής Κατάλυση	95
d.	In-Situ Μετεστεροποίηση	96
v.	Μέθοδοι Συνδυασμού της Εξαγωγής των Λιπιδίων με τη Μετεστεροποίηση	97
a.	Χρήση Υπερκρίσιμων Ρευστών	97

b.	Άλλες Μέθοδοι	98
8.	ΔΙΑΘΕΣΗ & ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗ ΤΟΥ ΥΠΟΛΕΙΜΜΑΤΟΣ ΤΗΣ ΒΙΟΜΑΖΑΣ ΤΩΝ ΜΙΚΡΟΦΥΚΩΝ	99
i.	Εισαγωγή	99
ii.	Αναερόβια Χώνευση	99
9.	ΦΟΡΟΛΟΓΙΑ ΚΑΥΣΙΜΩΝ ΣΤΗΝ Ε.Ε.	101
i.	Φόρος Άνθρακα	101
ii.	Η φορολογία στην Ενέργεια για κράτη της Ε.Ε.	101
a.	Ισχύουσες Διατάξεις	101
b.	Πρόσφατες Τροποποιήσεις	101
c.	Όρια για Καύσιμα	102
d.	Όρια για το CO ₂	102
e.	Όρια για την Ενέργεια	103
f.	Τα οφέλη της νέας τροπολογίας για τη φορολόγηση της ενέργειας στην Ε.Ε.	104
IV.	ΜΕΛΕΤΕΣ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΩΝ	105
1.	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	105
2.	ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΚΑΙ ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΤΕΧΝΙΚΟΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ	105
i.	Ανοικτή Λίμνη	106
ii.	Φωτοβιοαντιδραστήρας (PBR)	107
3.	ΒΑΣΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΑΙ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ ΓΙΑ ΤΙΣ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ ΠΟΥ ΜΕΛΕΤΩΝΤΑΙ	109
i.	Σενάριο 1 ^ο – Πτολεμαΐδα	109
ii.	Σενάριο 2 ^ο – Μεγαλόπολη	109
iii.	Σενάριο 3 ^ο – Κερατσίνι	109
iv.	Σενάριο 4 ^ο – Σάμος	110
v.	Σενάριο 5 ^ο – Μήλος	110
4.	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΛΕΤΗΣ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΩΝ	111
i.	Ετήσια Δέσμευση CO ₂ από τις Μονάδες της ΔΕΗ	111
ii.	Απαιτούμενη Έκταση	112
iii.	Συνολική Ετήσια Παραγωγή Βιοντίζελ	113
iv.	Συνολικό Πάγιο Κόστος	113
v.	Συνολικό Ετήσιο Λειτουργικό Κόστος	114
vi.	Συνολικά Ετήσια Έσοδα από Πώληση Βιοντίζελ	115
vii.	Αποτίμηση Κέρδους/Ζημιάς σε Ετήσια Βάση	115
viii.	Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας για Κάλυψη των Αναγκών της Μονάδας	116
5.	ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	117
i.	Τεχνικοοικονομική Ανάλυση	117
ii.	Αποτίμηση Βιωσιμότητας Μονάδας	119
iii.	Περιβαλλοντική Αποτίμηση Λειτουργίας Μονάδας	120
V.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	121
VI.	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	124
VII.	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	133

Ευχαριστίες

Αρχικά, θέλω να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στον κ. Κούκιο, ο οποίος ήταν ο επιβλέπων καθηγητής αυτής της διπλωματικής εργασίας. Τα σχόλια, οι παρατηρήσεις και οι προτάσεις του συνέβαλαν στη βελτίωση της τελικής ποιότητας του έργου αυτού. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τους κ.κ. Καραογλάνογλου και Κουλλά, οι οποίοι με καθοδήγησαν καθόλη τη διάρκεια της έρευνας, της σκέψης και της συγγραφής αυτής της μελέτης. Οι ιδέες, τα σχόλια και η συνολική βοήθεια τους είχαν καθοριστικό ρόλο στην επιτυχή περάτωση αυτής της διπλωματικής εργασίας. Τέλος, ευχαριστώ τους γονείς μου και τους φίλους μου για τη στήριξη που μου προσέφεραν καθόλη τη διάρκεια των προπτυχιακών σπουδών μου.

I. ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα μικροφύκη αποτελούν μία εναλλακτική πηγή για την παραγωγή βιοντίζελ καθώς παρουσιάζουν αρκετά πλεονεκτήματα συγκριτικά με άλλες πρώτες ύλες για την παραγωγή βιοντίζελ. Το υψηλό λιπιδιακό τους περιεχόμενο καθώς και η παραγωγικότητα τους είναι μερικά από αυτά. Η επιλογή της τοποθεσίας της μονάδας γίνεται βάσει της ηλιοφάνειας, της θερμοκρασίας και της διαθεσιμότητας νερού και θρεπτικών συστατικών. Επίσης, αναγκαία είναι η εκτίμηση της απαιτούμενης έκτασης για την εγκατάσταση της μονάδας. Επιπρόσθετα, πραγματοποιείται συγκριτική ανάλυση των διαφόρων ειδών μικροφυκών ώστε να καθοριστεί το πλέον κατάλληλο είδος για κάθε χρήση, κάτι το οποίο οδηγεί σε μία συνολική παρουσίαση της πληθώρας των διαφόρων εφαρμογών των μικροφυκών. Η καλλιέργεια των μικροφυκών λαμβάνει χώρα σε ειδικούς αντιδραστήρες. Αυτοί είναι, συνήθως, είτε ανοικτές λίμνες είτε φωτοβιοαντιδραστήρες. Οι τελευταίοι είναι πιο ακριβοί, αλλά προσφέρουν αυξημένες τιμές παραγωγικότητας, αποφυγή μόλυνσης και ευκολότερη λειτουργία. Το στάδιο που ακολουθεί μετά την καλλιέργεια είναι αυτό της συλλογής. Η φυγοκέντριση και η κροκίδωση συνήθως προτιμώνται λόγω της υπάρχουσας τεχνολογίας και της υψηλής απόδοσης σε σχετικά χαμηλό κόστος αντίστοιχα. Μετά τη συλλογή απαιτείται απονέρωση των μικροφυκών που ακολουθείται από διάσπαση των κυττάρων, ώστε η εξαγωγή των λιπιδίων να είναι αποδοτικότερη και να μειωθεί η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας σε αυτό το στάδιο. Η εξαγωγή των λιπιδίων είναι η διεργασία κατά την οποία τα έλαια, υπό τη μορφή λιπιδίων, ανακτώνται από τα μικροφύκη ώστε να μετατραπούν στη συνέχεια σε βιοντίζελ μέσω της μετεστεροποίησης, μιας καταλυτικής αντίδρασης με αλκοόλη προς σχηματισμό μεθυλεστέρα λιπαρών οξέων (FAME), δηλαδή βιοντίζελ. Εκτός από τη μελέτη της παραγωγικής διαδικασίας, πραγματοποιείται μία ανασκόπηση της νέας φορολογικής πολιτικής, η οποία πρόκειται να ακολουθηθεί από την Ε.Ε. στις δύο επόμενες δεκαετίες, αναφορικά με την ενεργειακή αποδοτικότητα των καυσίμων και τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου. Ο σκοπός αυτής της μελέτης είναι η παρουσίαση της επισκόπησης ορισμένων σεναρίων για μονάδες παραγωγής βιοντίζελ από μικροφύκη στην Ελλάδα, συνοδευόμενη από τεχνικο-οικονομική ανάλυση για κάθε ένα από αυτά. Τέλος, γίνεται αποτίμηση της βιωσιμότητας και του περιβαλλοντικού χαρακτήρα των σεναρίων αυτών.

ABSTRACT

Microalgae present an alternative source for biodiesel production as they demonstrate several advantages compared to other sources for this purpose. High lipid content and productivity are some of them. Location selection criteria must concern solar irradiance, temperature and water and nutrients availability. Also, there must be an estimation of the area needed to install the production unit. Furthermore, comparative analysis of different microalgae species is made to determine the selection of the most appropriate species for each use, which leads to an overall demonstration of the plethora of different applications of microalgae. Microalgae cultivation takes place at specified reactors. These reactors are usually either open ponds or photobioreactors. The latter are more expensive but offer higher productivity values, contamination evasion and easier operation. The stage that follows after cultivation is harvesting. Centrifugation and flocculation are usually preferred due to mainstream technology and high efficiency at relatively low costs respectively. After harvesting, dewatering of microalgae followed by cell disruption is needed in order to make lipid extraction more efficient and decrease electricity consumption at this stage. Lipid extraction is the process where oil, in the form of lipids, is subtracted from microalgae in order to be converted to biodiesel via transesterification, a catalytic reaction with alcohol to form fatty acid methyl ester (FAME), i.e. biodiesel. Apart from the study of the production process, there is a review of new tax policies, which will be followed by the EU in the next two decades, concerning fuels energy efficiency and greenhouse gases (GHGs). The purpose of this study is to present an overview of several scenarios for biodiesel production from microalgae units throughout Greece accompanied by techno-economic analysis for each one of them. At last, viability and environmental assessments are being conducted for each scenario.

II. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία διερευνάται η βιωσιμότητα μιας μονάδας παραγωγής βιοντίζελ από μικροφύκη εντός της Ελλάδας. Τα μικροφύκη αποτελούν μία από τις πλέον υποσχόμενες εναλλακτικές πηγές για την παραγωγή βιοκαυσίμων. Σε αυτό το συμπέρασμα οδηγούν το υψηλό περιεχόμενο τους σε λιπίδια καθώς και οι υψηλές τιμές παραγωγικότητας και παραγωγής βιοντίζελ οι οποίες είναι αρκετά υψηλότερες συγκριτικά με εναλλακτικές πρώτες ύλες, οι οποίες είναι φυσικές προς το περιβάλλον, όπως η αιθανόλη, το φοινικέλαιο και το καλαμπόκι. Η παραγωγή βιοντίζελ από μικροφύκη βασίζεται στην εξαγωγή των ελαίων που αυτά περιέχουν (με τη μορφή λιπιδίων) και η μετέπειτα μετατροπή τους σε βιοκαύσιμο, στην περίπτωση αυτή βιοντίζελ, μέσω της διαδικασίας της μετεστεροποίησης. Στόχος είναι η παραγωγή μεγάλων ποσοτήτων βιοντίζελ, οπότε αναγκαία κρίνεται η ανάπτυξη των μικροφυκών ώστε η ποσότητα των ελαίων που θα εξαχθούν από αυτά να ανταποκρίνεται σε βιομηχανική παραγωγή βιοκαυσίμου, με στόχο η μονάδα παραγωγής να μπορεί να κριθεί βιώσιμη τόσο τεχνικά όσο και οικονομικά. Η εξαγωγή των ελαίων από τα μικροφύκη είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί με διάφορους τρόπους. Στις πιο δημοφιλείς τεχνικές διακρίνονται η επεξεργασία τους με σογιέλαιο και η χρήση υπερκρίσιμων ρευστών. Πριν από αυτό το στάδιο κρίνεται επιθυμητή η απονέρωση των μικροφυκών τα οποία έχουν συλλεχθεί. Η συλλογή τους μπορεί να επιτευχθεί με την επιλογή μίας διεργασίας από την πληθώρα των τεχνικών που απαρτίζουν το σύνολο των διαφορετικών τρόπων συλλογής των μικροφυκών από την καλλιέργεια. Οι πιο σημαντικές τεχνικές συλλογής είναι η φυγοκέντριση και η χημική κατακρήμνιση λόγω της χρήσης υπάρχουσας τεχνολογίας και της υψηλής απόδοσης σε σχετικά χαμηλό κόστος αντίστοιχα. Άλλο ένα πλεονέκτημα των δύο αυτών τεχνικών είναι η ευκολία χρήσης τους. Παρόλα αυτά, παρουσιάζονται και ορισμένα προβλήματα όπως ο κίνδυνος καταστροφής της κυτταρικής δομής των μικροφυκών, στην περίπτωση της φυγοκέντρισης η οποία ταυτόχρονα είναι αρκετά ενεργοβόρα. Όμως πριν συλλεχθούν, τα μικροφύκη αναπτύσσονται δημιουργώντας καλλιέργειες με τον πολλαπλασιασμό τους. Οι καλλιέργειες αυτές διακρίνονται, κυρίως, σε αυτότροφες, ετερότροφες και μικτότροφες. Οι αυτότροφες χρησιμοποιούν τη διαδικασία της φωτοσύνθεσης για να αναπτυχθούν, οι ετερότροφες θρεπτικά συστατικά, κυρίως οργανικές ενώσεις, ενώ οι μικτότροφες αποτελούν έναν συνδυασμό των δύο προηγούμενων. Οι αντιδραστήρες στους οποίους αναπτύσσεται ο πληθυσμός των μικροφυκών είναι δύο τύπων: ανοικτές λίμνες και φωτοβιοαντιδραστήρες. Οι ανοικτές λίμνες έχουν χαμηλό κόστος εγκατάστασης και πιο απλή λειτουργία, όμως ο κίνδυνος μόλυνσης της καλλιέργειας είναι υψηλός και η ρύθμιση των συνθηκών του συστήματος είναι αρκετά δύσκολη. Παρόλα αυτά, το μεγαλύτερο πρόβλημα κατά τη λειτουργία της ανοικτής λίμνης είναι ο υψηλός ρυθμός εξάτμισης του νερού της καλλιέργειας. Την εναλλακτική λύση αποτελούν οι φωτοβιοαντιδραστήρες (PBR). Σε αυτήν την περίπτωση, το κόστος εγκατάστασης είναι αρκετά υψηλότερο, όμως αποφεύγονται προβλήματα μόλυνσης, ρύθμισης συνθηκών, αλλά αυξάνεται το λειτουργικό κόστος, με σημαντικό παράγοντα της αλλαγής αυτής, τις απαιτήσεις σε ψύξη.

Τα προηγούμενα αφορούν τη διαδικασία παραγωγής στο σύνολο της. Εντούτοις, ένα σημαντικό κομμάτι μίας τεχνικο-οικονομικής ανάλυσης της παραγωγής βιοντίζελ από μικροφύκη αποτελεί η επιλογή της τοποθεσίας της μονάδας καθώς και οι παροχές πρώτων

υλών σε αυτή. Η τοποθεσία επιλέγεται μετά από έρευνα η οποία δείχνει ότι συναντάται ένας συγκεκριμένος αριθμός κριτηρίων που αφορούν, σε αρχικό επίπεδο, στην ηλιοφάνεια, την θερμοκρασία και την απαιτούμενη έκταση για την εγκατάσταση αυτής. Στην εκτίμηση των δύο πρώτων παραγόντων ενδιαφέρουν εκτός της μέσης ετήσιας τιμής, οι ακραίες τιμές και η διακύμανση, διότι η ανάπτυξη των μικροφυκών είναι πολύ ευαίσθητη σε αυτούς τους παράγοντες. Επίσης, η διαθεσιμότητα νερού και θρεπτικών συστατικών, κυρίως άζωτο και φώσφορος, έχει σημαντικό ρόλο, οπότε προτιμώνται παραθαλάσσιες περιοχές ή περιοχές όπου υπάρχει μονάδα επεξεργασίας αστικών λυμάτων σε κοντινή απόσταση, ώστε να είναι εύκολη, και χαμηλού κόστους, η παροχή νερού και θρεπτικών συστατικών στο σύστημα. Επίσης, σημαντικός παράγοντας για το λειτουργικό κόστος είναι η κατανάλωση ηλεκτρισμού από τη μονάδα, αν και υπάρχει περίπτωση αντιστάθμισης της μέσω της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από το βιοαέριο που παράγεται με αναερόβια χώνευση στο τελευταίο στάδιο της λειτουργίας της μονάδας. Τέλος, η πιο σημαντική ροή τροφοδοσίας της μονάδας είναι η ροή διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) η οποία παρέχει τον άνθρακα ο οποίος απαιτείται για την ανάπτυξη των μικροφυκών. Το CO₂ συνήθως παρέχεται από μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, οι οποίες κατά προτίμηση βρίσκονται σε κοντινή απόσταση από τη μονάδα. Η δέσμευση του CO₂ αποτελεί μία υπηρεσία που παρέχεται από τη μονάδα, αφού οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου (Greenhouse Gases - GHGs) και ειδικότερα οι εκπομπές CO₂ υπόκεινται σε φορολογία από την Ευρωπαϊκή Ένωση (E.E.) και βάσει πρόσφατης απόφασης (έτος 2013), αναμένεται φόρος 20 € ανά τόνο εκπεμπόμενου CO₂.

Επιπρόσθετα, η E.E. αλλάζει τη φορολογική πολιτική στα καύσιμα φορολογώντας, πλέον, το ενεργειακό περιεχόμενο του καυσίμου αντί του όγκου του (9.6 €/GJ). Από τη φορολογία αυτή απαλλάσσονται προσωρινά τα βιοκαύσιμα, διότι η E.E. επενδύει στις εναλλακτικές μορφές ενέργειας ως κομμάτι της περιβαλλοντικής πολιτικής που ακολουθείται τα τελευταία χρόνια. Με αυτόν τον τρόπο, τα βιοκαύσιμα καθίστανται ανταγωνιστικά των συμβατικών καυσίμων, τα οποία έχουν χαμηλότερο κόστος, υψηλότερο ενεργειακό περιεχόμενο αλλά και υψηλότερες εκπομπές CO₂ κατά τη διάρκεια του σταδίου της παραγωγής τους.

Το κόστος παραγωγής του βιοντίζελ από τα μικροφύκη καθορίζεται από δύο ισχυρούς παράγοντες της παραγωγής. Αυτοί είναι η συλλογή και η απονέρωση. Για αυτόν τον λόγο, έχουν αναπτυχθεί πολλές διαφορετικές τεχνικές για τη συλλογή, δημοφιλέστερες των οποίων είναι η φυγοκέντριση, η κροκίδωση και η επίπλευση με διαλυμένο αέρα (DAF). Ακόμη, μελλοντικές μέθοδοι συλλογής, όπως για παράδειγμα η μαγνητική συλλογή, αναλύονται με σχολιασμό για τις προοπτικές τις οποίες παρουσιάζουν στη μείωση του κόστους αυτού του σταδίου διατηρώντας την απόδοση σε υψηλά επίπεδα. Η απονέρωση συνήθως πραγματοποιείται με ξήρανση των μικροφυκών με την επιλογή του “freeze drying” να αποτελεί μία από τις πλέον υποσχόμενες τεχνικές.

Η απονέρωση αποτελεί το ένα από τα δύο στάδια προεπεξεργασίας των μικροφυκών προτού λάβει χώρα η εξαγωγή των λιπιδίων από αυτά. Το άλλο στάδιο, το οποίο έπεται της απονέρωσης, είναι η διάσπαση των κυττάρων, για την οποία, συνήθως, προτιμάται η άλεση των σωματιδίων, σε βιομηχανική κλίμακα. Τα στάδια προεπεξεργασίας των μικροφυκών, πριν από την εξαγωγή των λιπιδίων από αυτά, έχουν ως στόχο την αύξηση της απόδοσης της τελευταίας.

Η εξαγωγή των λιπιδίων πραγματοποιείται με προσθήκη μίγματος οργανικών διαλυτών (πολικού-μη πολικού) με τους πιο συνηθισμένους οργανικούς διαλύτες να είναι το εξάνιο, ή το χλωροφόρμιο, σε συνδυασμό με τη μεθανόλη. Μετά την εξαγωγή, ακολουθεί διαχωρισμός των πολικών από τα ουδέτερα λιπίδια, με δημιουργία διφασικού συστήματος, με τα τελευταία να οδηγούνται στο στάδιο της μετεστεροποίησης. Στο στάδιο αυτό, τα τριγλυκερίδια (ουδέτερα λιπίδια) αντιδρούν με μία αλκοόλη, συνήθως μεθανόλη, προς σχηματισμό μεθυλεστέρα λιπαρών οξέων (FAME), ο οποίος αποτελεί το βιοντίζελ, και γλυκερίνης.

Τέλος, μέσω της γνώσης, η οποία αποκτάται από την ανάλυση των επιμέρους σταδίων της παραγωγής βιοντίζελ από μικροφύκη, μελετάται η εφαρμογή της διαδικασίας αυτής σε πραγματικές συνθήκες, εξετάζοντας τα χαρακτηριστικά ορισμένων μονάδων παραγωγής στην Ελλάδα. Πιο συγκεκριμένα, μελετώνται οι περιπτώσεις της εγκατάστασης μονάδας παραγωγής βιοντίζελ από μικροφύκη στην Πτολεμαΐδα, στη Μεγαλόπολη, στο Κερασίι, στη Σάμο και στη Μήλο. Οι επιλογές αυτές προέκυψαν βάσει ορισμένων κριτηρίων, σημαντικότερο από τα οποία είναι η ύπαρξη μονάδας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας της ΔΕΗ, και κατετάγησαν βάσει των εκπομπών CO₂ από τις μονάδες αυτές. Τα αποτελέσματα της μελέτης αυτής παρουσιάζουν τα τεχνικά και τα οικονομικά χαρακτηριστικά καθεμίας μονάδας καθώς και την αποτίμηση βιωσιμότητας και περιβαλλοντικού χαρακτήρα των μονάδων αυτών.

III. ΜΕΛΕΤΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΒΙΟΝΤΙΖΕΛ ΑΠΟ ΜΙΚΡΟΦΥΚΗ

1. Γενικά για τα Μικροφύκη

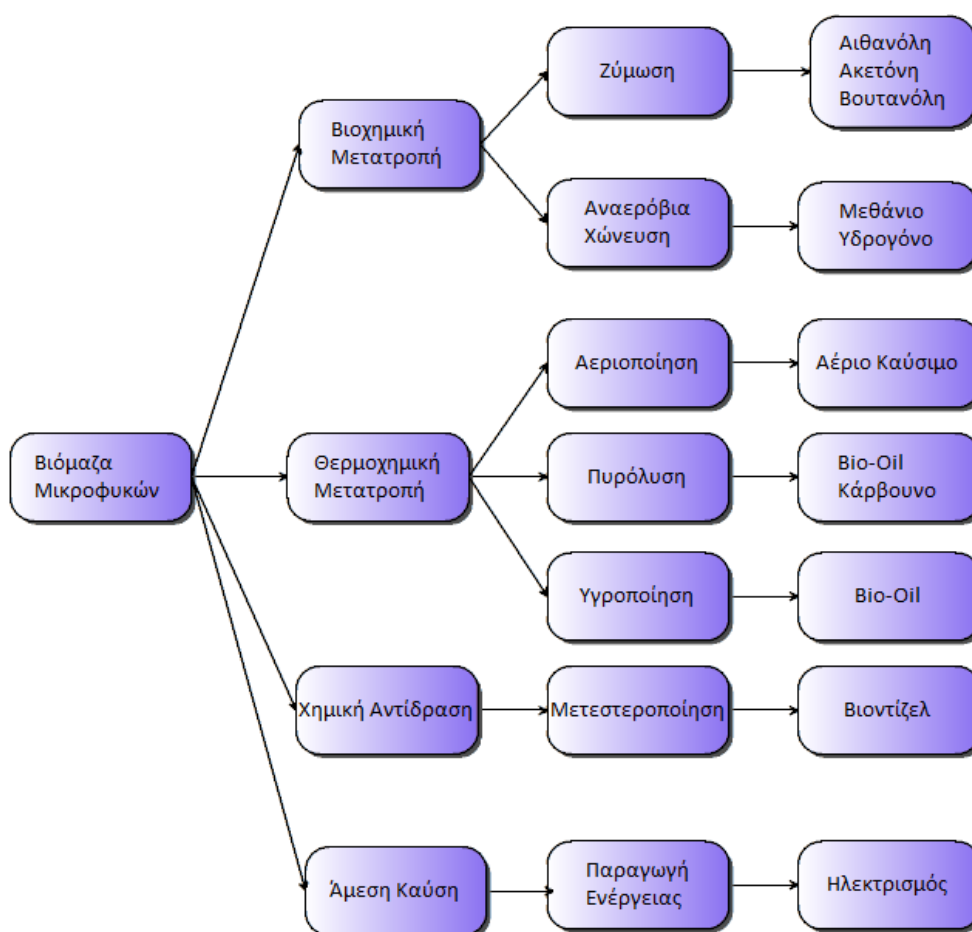
i. Μικροφύκη και Βιοτεχνολογία

Τα μικροφύκη είναι μικροσκοπικοί φωτοσυνθετικοί οργανισμοί οι οποίοι βρίσκονται σε γλυκά και αλμυρά (θαλασσινά) νερά. Ο μηχανισμός τον οποίο χρησιμοποιούν για να πραγματοποιήσουν την φωτοσύνθεση είναι παρόμοιος με αυτόν που χρησιμοποιείται από τους φυτικούς οργανισμούς του εδάφους. Το προηγούμενο εξηγείται από την απλή κυτταρική δομή και το γεγονός ότι αποτελούν μέρος ενός υδατικού συστήματος, οπότε η χρήση του νερού, του CO₂ και των θρεπτικών συστατικών από αυτούς τους μικροοργανισμούς παρουσιάζει αυξημένη απόδοση, όπως και η μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε βιόμαζα. Η απουσία μη φωτοσυνθετικών υποστηρικτικών δομών (ρίζες, κοτσάνια) αποτελεί άλλο ένα πλεονέκτημα των μικροφυκών, τα οποία βρίσκονται, προφανώς, σε υδατικό περιβάλλον, σε σύγκριση με τους άλλους φυτικούς μικροοργανισμούς. [1]

Ένα μεγάλο πλεονέκτημα της χρήσης μικροφυκών για την παραγωγή βιοντίζελ, και βιοκαυσίμων γενικότερα, αποτελεί το γεγονός ότι είναι η μόνη ανανεώσιμη πηγή για την επίτευξη αυτού του σκοπού. Επιπρόσθετα, τα μικροφύκη έχουν μικρότερο πολύ μικρότερο αντίκτυπο στο περιβάλλον και στην παγκόσμια αγορά τροφίμων από τις λοιπές συμβατικές πηγές όπως η βιοαιθανόλη. Ακόμη, στη σύγκριση του βιοντίζελ που παράγεται από μικροφύκη με αυτό που παράγεται από τις υπόλοιπες «πράσινες» πηγές, το πρώτο παρουσιάζει υψηλότερη θερμιδική αξία (calorific value), χαμηλότερο ιξώδες και χαμηλότερη πυκνότητα, ιδιότητες που το καθιστούν προτιμότερο από αυτό που παράγεται από τους περιβαλλοντικά φιλικούς ανταγωνιστές των μικροφυκών. Επίσης, τα μικροφύκη έχουν υψηλό λιπιδιακό περιεχόμενο και υψηλές τιμές παραγωγικότητας. Η επιλογή από μία πληθώρα στελεχών για τη βελτιστοποίηση της παραγωγής και της παραγωγικότητας ταυτόχρονα, αποτελεί αποκλειστικό προνόμιο της παραγωγής βιοντίζελ από μικροφύκη. Επίσης, διαφορετικά στελέχη μπορούν να επιλεγούν ώστε να παραχθεί βιοντίζελ διαφορετικών προδιαγραφών. Επίσης, τα μικροφύκη χρησιμοποιούνται για την παραγωγή διαφόρων άλλων προϊόντων, εκτός από τα βιοκαύσιμα, όπως τρόφιμα, συμπληρώματα διατροφής, ωμέγα-3 λιπαρά οξέα, ζωοτροφές, πηγές ενέργειας (βιοντίζελ, βιοαιθανόλη, βενζίνη, αεροπορικά καύσιμα), οργανικά λιπάσματα, βιοδιασπώμενα πλαστικά, ανασυνδυασμένες πρωτεΐνες, βαφές, ιατρικά και φαρμακευτικά προϊόντα καθώς και εμβόλια. [1]

Μετά από ορισμένα χρόνια, εκτιμάται ότι τα μικροφύκη θα αποτελέσουν την κύρια ανανεώσιμη πηγή καυσίμων. Συνοπτικά, παρουσιάζονται στη συνέχεια τα πλεονεκτήματα της χρήσης τους για την επίτευξη αυτού του σκοπού.

- Αυξημένη μετατροπή φωτονίων από την ηλιακή ακτινοβολία (περίπου 3.8% αντί 0.5% των φυτικών οργανισμών στη Γη).
- Αυξημένη παραγωγή βιόμαζας σε σύγκριση με τους υπόλοιπους φυτικούς οργανισμούς.
- Αυξημένος ρυθμός αναπαραγωγής (περίπου 1-3 διπλασιασμοί ανά ημέρα).
- Υψηλή χωρητικότητα για δέσμευση CO₂.
- Είναι δυνατή η ανάπτυξη τους σε υγρό μέσο με ευκολία χειρισμού και δυνατότητα χρήσης αλμυρού (θαλασσινού) νερού, καθώς και της απορροής ενός βιολογικού καθαρισμού, μειώνοντας με αυτόν τον τρόπο τη χρήση γλυκού νερού, οπότε και τις απαιτήσεις σε αυτό.
- Δυνατότητα χρήσης αζώτου και φωσφόρου από υγρά λυμάτων διαφόρων ειδών δραστηριοτήτων (αγροτικές, κτηνοτροφικές, βιομηχανικές) καθώς και από αστικά λύματα.
- Χρήση μη καλλιεργήσιμων εκτάσεων (έρημος, παραλιακές εκτάσεις), οπότε αποφυγή ανταγωνισμού με εκτάσεις όπου καλλιεργούνται τρόφιμα και εμφάνιση του διλήμματος: αγροτικές καλλιεργήσιμες εκτάσεις για τρόφιμα ή για καύσιμα;
- Η παραγωγή δεν είναι εποχική και μπορεί να συλλεχθεί καθόλη τη διάρκεια του έτους (με διεργασίες διαλείποντος έργου).
- Οι καλλιέργειες μπορούν να προσανατολιστούν στην παραγωγή υψηλής συγκέντρωσης πρώτων υλών (άμυλο, λάδι και βιόμαζα).
- Τα συστήματα παραγωγής βιόμαζας από μικροφύκη μπορούν εύκολα να προσαρμοστούν σε διάφορα επίπεδα δυνατοτήτων λειτουργίας και τεχνολογίας.
- Τα μικροφύκη μπορούν να καλλιεργηθούν χωρίς λιπάσματα ή φυτοφάρμακα με αποτέλεσμα την αποφυγή ρύπανσης από αυτά και τα λύματα τους.
- Οι εκπομπές οξειδίων του αζώτου (NO_x), μπορούν να ελαχιστοποιηθούν στην περίπτωση χρήσης μικροφυκών για την παραγωγή βιοντίζελ.
- Η μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας σε χημική ενέργεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή μίας πληθώρας βιοκαυσίμων. Πιο αναλυτικά, τα πρωτόνια και τα ηλεκτρόνια μπορούν να χρησιμοποιηθούν στη σύνθεση βιοϋδρογόνου για καύσιμο (Bio-H₂), τα σάκχαρα και το άμυλο στη σύνθεση βιοαιθανόλης, τα έλαια στη σύνθεση του βιοντίζελ και η βιόμαζα στη σύνθεση υγρών καυσίμων με χρήση των πολυσταδιακών διεργασιών BTL (Biomass to Liquid), όπως η διεργασία Fischer-Tropsch, και στη σύνθεση βιομεθανίου. Οι συνθέσεις αυτές πραγματοποιούνται ακολουθώντας βιοχημικές, θερμοχημικές, χημικές οδούς καθώς και διεργασίες άμεσης καύσης.
- Η παραγωγή παραπροϊόντων υψηλής προστιθέμενης αξίας (πρωτεΐνες, πολυσακχαρίτες, βαφές, βιοπολυμερή, ζωοτροφές, λιπάσματα κ.α.).



Εικόνα III.1.1: Αξιοποίηση Βιόμαζας Μικροφυκών

Η φωτοσύνθεση είναι οδηγός του πρώτου βήματος της μετατροπής της ηλιακής ακτινοβολίας σε χημική ενέργεια. Αυτό σημαίνει, ότι είναι υπεύθυνη για την παραγωγή πρώτων υλών οι οποίες απαιτούνται από τις παραγωγικές διαδικασίες όλων των ειδών βιοκαυσίμου, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως στα κύρια πλεονεκτήματα της χρήσης μικροφυκών για την επίτευξη αυτού του σκοπού. [1]

Οι βιώσιμες, από τεχνικοοικονομικής άποψης, εναλλακτικές ανανεώσιμες πηγές για την παραγωγή βιοκαυσίμων είναι το βιοντίζελ και η βιοαιθανόλη, οι οποίες σήμερα αποτελούν εμπορικά προϊόντα, τα οποία όμως βρίσκονται σε χαμηλή κατανάλωση. Αμφότερα, τα δύο αυτά καύσιμα, μπορούν να αντικαταστήσουν το ντίζελ και τη βενζίνη αντίστοιχα με μικρές μετατροπές στους κινητήρες των οχημάτων. Η παραγωγή τους, καθώς και η διανομή τους, μπορούν να πραγματοποιηθούν με τη χρήση υπάρχουσας τεχνολογίας και συστημάτων διανομής αντίστοιχα. [1]

Στην περίπτωση, αντικατάστασης του αργού πετρελαίου από ανανεώσιμες πηγές, για τη χρήση τους ως πρώτη ύλη για την παραγωγή καυσίμων, απαιτούνται πολύ μεγάλες εκτάσεις εδάφους. Πιο συγκεκριμένα, στην περίπτωση παραγωγής βιοκαυσίμων από σακχαροκάλαμο ή φοινικέλαιο απαιτούνται περίπου 5 δισεκατομμύρια στρέμματα, από

μεθανόλη, η οποία προέρχεται από σιτάρι, καλαμπόκι ή σακχαρότευτλα, απαιτούνται 18-36 δισεκατομμύρια στρέμματα. Αυτοί οι υπολογισμοί βασίζονται στον τρόπο παραγωγής των βιοκαυσίμων στις βιομηχανικά ανεπτυγμένες χώρες. [1]

Η συνολική απόδοση της μετατροπής της ηλιακής ακτινοβολίας σε χημική ενέργεια καθορίζει την παραγωγικότητα των πρώτων υλών και επακόλουθα τη συνολική απαιτούμενη έκταση για τη μονάδα παραγωγής. Στην περίπτωση της παραγωγής βιοκαυσίμων από αιθανόλη, η απόδοση αυτή ανέρχεται σε περίπου 0.16%, ενώ στην περίπτωση του φοινικέλαιου το ποσοστό αυτό είναι κατά προσέγγιση 0.15%. Τα ποσοστά αυτά είναι σημαντικά υψηλότερα από τα αντίστοιχα για την παραγωγή βιοκαυσίμων από σιτάρι και ελαιοκράμβη. [1]

Και τα δύο καύσιμα (βιοντίζελ και βιοαιθανόλη), παράγονται σε αυξημένες ποσότητες για εναλλακτικά καύσιμα, αλλά η παραγωγή τους σε μεγάλες ποσότητες δεν είναι βιώσιμη από τεχνικοοικονομικής σκοπιάς. [1]

Σήμερα, μόνο το 1% της συνολικής καλλιεργήσιμης έκτασης, σε παγκόσμια κλίμακα, η οποία υπολογίζεται 140 εκατομμύρια στρέμματα, χρησιμοποιείται για την παραγωγή βιοκαυσίμων, καλύπτοντας 1% της παγκόσμιας αγοράς καυσίμων που χρησιμοποιούνται για μεταφορές. Αύξηση του ποσοστού είναι πολύ δύσκολο να επιτευχθεί, αφού η υπόλοιπη έκταση χρησιμοποιείται για την καλλιέργεια τροφίμων. [1]

Η περίπτωση της παραγωγής βιοκαυσίμων από μικροφύκη παρουσιάζει έναν μεγάλο αριθμό διαφορετικών οδών που μπορούν να ακολουθηθούν για τη μετατροπή της βιόμαζας των μικροφυκών σε βιοκαύσιμα. Αυτές οι οδοί μπορούν να καταταχθούν βάσει τριών μεγάλων κατηγοριών. Η πρώτη κατηγορία αφορά στις διεργασίες μετατροπής των λιπιδίων και των υδατανθράκων που προέρχονται από τα μικροφύκη και τη μετατροπή τους σε βιοκαύσιμα, η δεύτερη στην επεξεργασία της συνολικής ποσότητας της βιόμαζας των μικροφυκών για την παραγωγή βιοκαυσίμων, όπως το βιοντίζελ και η βιοαιθανόλη και η τρίτη στην άμεση παραγωγή ανανεώσιμων μορίων βιοκαυσίμων, όπως αιθανόλη, υδρογόνο, μεθάνιο και αλκάνια από τα μικροφύκη χωρίς την απαίτηση ύπαρξης σταδίου εξαγωγής των λιπιδίων, και άλλων ουσιών, από αυτά. [1]

ii. Γιατί μικροφύκη για την παραγωγή βιοντίζελ;

Τα μικροφύκη είναι προκαρυωτικοί και ευκαρυωτικοί φωτοσυνθετικοί μικροοργανισμοί, οι οποίοι μπορούν να αναπτύσσονται με μεγάλη ταχύτητα και να επιβιώνουν σε δυσμενείς για αυτούς επικρατούσες συνθήκες στο περιβάλλον τους, λόγω της δομής τους. Η τελευταία διακρίνεται σε μονοκυτταρική (unicellular) και σε απλή πολυκυτταρική (multicellular). Παραδείγματα προκαρυωτικών μικροοργανισμών αποτελούν τα κυανοβακτήρια ή κυανοφύκη (*Cyanophyceae*) και ευκαρυωτικών τα πράσινα φύκη (*Chlorophyta*) και τα διάτομα (diatoms) (*Bacillariophyta*). [2]

Τα μικροφύκη βρίσκονται σε όλα τα οικοσυστήματα που υπάρχουν στον πλανήτη Γη. Δεν βρίσκονται μόνο στα υδάτινα οικοσυστήματα, όπως υποδηλώνει το όνομα τους, αλλά υπάρχουν και στα οικοσυστήματα του εδάφους, εκπροσωπώντας μία ποικιλία ειδών μικροοργανισμών τα οποία επιβιώνουν σε ένα ευρύ φάσμα περιβαλλοντικών συνθηκών. Εκτιμάται ότι υπάρχουν περισσότερα από 50.000 διαφορετικά είδη μικροφυκών στον πλανήτη, αλλά μόνο περίπου τα 30.000 από αυτά έχουν μελετηθεί. [2]

Κατά τη διάρκεια των προηγούμενων δεκαετιών, δημιουργήθηκαν εκτενείς συλλογές μικροφυκών από ερευνητές σε διάφορες χώρες του κόσμου. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η συλλογή μικροφυκών του γλυκού νερού του Πανεπιστημίου της Κοϊμπρα στην Πορτογαλία, η οποία θεωρείται μία από τις μεγαλύτερες συλλογές μικροφυκών σε παγκόσμιο επίπεδο, αφού περιλαμβάνει 4000 στελέχη (strains) και 1000 είδη μικροφυκών. Η συγκεκριμένη συλλογή επιβεβαιώνει την ύπαρξη μεγάλης ποικιλίας διαφορετικών ειδών μικροφυκών, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μία πληθώρα εφαρμογών, όπως η παραγωγή προϊόντων υψηλής προστιθέμενης αξίας για φαρμακευτικούς σκοπούς, η χρήση τους σε καλλιέργειες τροφίμων, τα οποία καταναλώνονται από τον άνθρωπο, η αξιοποίηση τους ως πηγή ενέργειας και ακόμη η παραγωγή βιοκαυσίμων, όπως το βιοντίζελ, η οποία εξετάζεται στη συγκεκριμένη περίπτωση. [2]

Η ύπαρξη μεγάλου αριθμού συλλογών μικροφυκών επιβεβαιώνει το ενδιαφέρον για την αξιοποίηση τους σε διάφορες εφαρμογές τα τελευταία χρόνια. Για παράδειγμα η συλλογή του πανεπιστημίου του Goettingen στη Γερμανία (SAG) ξεκίνησε στις αρχές της δεκαετίας του 1920 και μέχρι στιγμής μετράει 2213 στελέχη και 1273 είδη μικροφυκών. Το 77% των στελεχών αυτών είναι πράσινα φύκη και το 8% κυανοβακτήρια. Ορισμένα είναι φύκη του γλυκού νερού και άλλα του αλμυρού. Άλλη μία αξιοσημείωτη συλλογή βρίσκεται στο πανεπιστήμιο του Τέξας των Η.Π.Α., το οποίο ξεκίνησε τη συλλογή μικροφυκών το 1953 η οποία σήμερα περιέχει 2300 διαφορετικά στελέχη μικροφυκών του γλυκού νερού, κυρίως πράσινα φύκη και κυανοβακτήρια, και αρκετά στελέχη θαλάσσιων πράσινων και κόκκινων φυκών. Ακόμη, μία συλλογή βρίσκεται στην Ασία και πιο συγκεκριμένα στη πόλη Ibaraki της Ιαπωνίας, όπου στεγάζεται το εθνικό ινστιτούτο περιβαλλοντικών μελετών (National Institute of Environmental Studies - NIES). Η συλλογή αυτή περιέχει 2150 στελέχη μικροφυκών, εκ των οποίων 700 αποτελούν διαφορετικά είδη. Τέλος, στην Αυστραλία υπάρχει η συλλογή των ζωντανών μικροφυκών του οργανισμού βιομηχανικής έρευνας και επιστημών της κοινοπολιτείας (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation – CSIRO, CSIRO Collection of Living Microalgae – CCLM), η οποία περιέχει 800 στελέχη διαφορετικών μικροφυκών, εκ των οποίων βρίσκονται κύριοι εκπρόσωποι σημαντικών κατηγοριών (major classes) μικροφυκών του γλυκού και του αλμυρού νερού. Επιπλέον, αξίζει να σημειωθεί ότι η πλειοψηφία των μικροφυκών έχουν απομονωθεί από τα ύδατα της περιοχής της Αυστραλίας. [2]

Επίσης, τα μικροφύκη παρουσιάζουν πολύ μικρότερο αποτύπωμα μπλε/πράσινου νερού, καθώς και συνολικό αποτύπωμα νερού, συγκριτικά με τις υπόλοιπες πηγές που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή του βιοντίζελ. Το αποτύπωμα νερού αφορά στην κατανάλωση νερού από διάφορες πηγές για την πραγματοποίηση μίας λειτουργίας. Αυτές οι πηγές είναι τρεις: μπλε, πράσινες, γκρι. Πιο συγκεκριμένα, το αποτύπωμα μπλε νερού αφορά στην κατανάλωση νερού από τις λεγόμενες “μπλε πηγές”, οι οποίες αποτελούνται από τα επιφανειακά νερά και τα νερά του εδάφους, το αποτύπωμα πράσινου νερού αφορά στην κατανάλωση νερού από τις λεγόμενες “πράσινες πηγές”, οι οποίες αποτελούνται από το νερό της βροχής και ειδικότερα στην απορροή αυτού, και το αποτύπωμα γκρι νερού, το οποίες αναφέρεται στην απαιτούμενη ποσότητα γλυκού νερού, η οποία αφομοιώνει τους ρύπους της βιομηχανικής λειτουργίας, ώστε να αποφευχθεί η μόλυνση, του κοντινού στη βιομηχανία, υδάτινου οικοσυστήματος. Τέλος το συνολικό αποτύπωμα νερού αφορά στο άθροισμα της κατανάλωσης μπλε, πράσινου και γκρι νερού. [3]

Παρακάτω φαίνονται δύο συγκριτικοί πίνακες με τις διάφορες πηγές για το βιοντίζελ, τις αντίστοιχες παραγωγικότητες λιπιδίων και το αποτύπωμα νερού της καθεμίας (διαφορετικές πηγές στον κάθε πίνακα).

Σοδειά	Παραγωγή Ελαίων (L/ha)
Καλαμπόκι	172
Σόγια	446
Φυστίκι	1059
Canola	1190
Ελαιοκράμβη	1190
Jatropha	1892
Karanj (<i>Pongamia pinnata</i>)	2590
Καρύδα	2689
Φοινικέλαιο	5950
Μικροφύκη (30% έλαια κ.β.)	58700
Μικροφύκη (70% έλαια κ.β.)	136900

Πίνακας III.1.1 [4]

Σοδειά	Αποτύπωμα Μπλε/Πράσινου Νερού	Συνολικό Αποτύπωμα Νερού
Αραβόσιτος	1583-1972	4015
Πατάτα	1214-1684	3748
Ζαχαροκάλαμο	1978-2131	3931
Ζαχαρότευτλο	1268-1284	2168
Σόργο	3153-6647	15331
Σόγια	6539-7521	16636
Switchgrass	2189	-
Καλαμπόκι	263-956	-
Μικροφύκη	280-400	591-3650

Πίνακας III.1.2 [5]

iii. Γενικά Στοιχεία για την Παραγωγή Βιοντίζελ από Μικροφύκη

Παρότι, με μία πρώτη ματιά, τα μικροφύκη δεν παρουσιάζουν ουσιαστικές διαφορές από άλλες κατηγορίες πρώτων υλών για την παραγωγή βιοντίζελ, αποτελούν μικροοργανισμούς που ζουν, κυρίως, σε υδατικά περιβάλλοντα και με κατάλληλη καλλιέργεια, συλλογή και επεξεργασία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αποδοτική παραγωγή βιοντίζελ. Οι υπάρχουσες διεργασίες για την παραγωγή βιοντίζελ από μικροφύκη περιλαμβάνουν μία μονάδα παραγωγής στην οποία αναπτύσσονται τα κύτταρα, τα οποία στη συνέχεια συλλέγονται από το μέσο της ανάπτυξης και τέλος εξάγονται τα λιπίδια από τα κύτταρα αυτά και με μία συγκεκριμένη διαδικασία, η οποία θα αναλυθεί αργότερα, παράγεται το βιοντίζελ.[2]

iv. Πλεονεκτήματα της χρήσης μικροφυκών για την παραγωγή βιοντίζελ

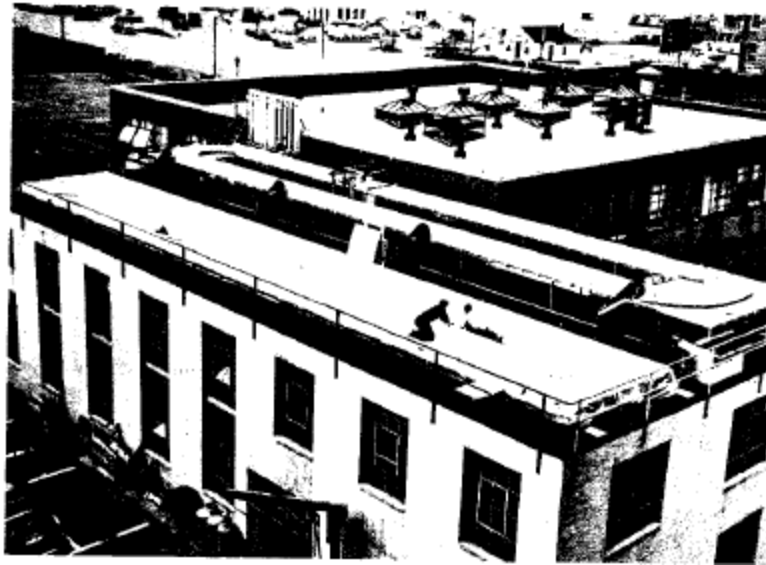
Πληθώρα αναφορών και ερευνών προτείνουν τη χρήση μικροφυκών για την παραγωγή βιοντίζελ. Αυτό συμβαίνει διότι κατά τη χρήση τους παρουσιάζονται ορισμένα πλεονεκτήματα. Από μία πρακτική σκοπιά, είναι εύκολο να καλλιεργηθούν σε μεγάλες εκτάσεις, χωρίς την ανάγκη συνεχούς παρακολούθησης, χρησιμοποιώντας νερό το οποίο κρίνεται ακατάλληλο για κατανάλωση από τον άνθρωπο. Επίσης, τα θρεπτικά συστατικά τους αποκτώνται εύκολα από τις ροές των αποβλήτων (κυρίως N,P) και τη γενικότερη βιομηχανική δραστηριότητα (CO₂). [2][6]

Η βιόμαζα των μικροφυκών μπορεί να χρησιμοποιηθεί ολόκληρη για την παραγωγή προϊόντων, επειδή δεν δημιουργούνται παραπροϊόντα κατά την ανάπτυξη τους τα οποία πρέπει να απομακρυνθούν για την περαιτέρω επεξεργασία των μικροφυκών, όπως κοτσάνια και φλοιοί. Άλλο ένα πλεονέκτημα της καλλιέργειας μικροφυκών είναι ότι αυτή μπορεί να πραγματοποιηθεί σε εκτάσεις εδάφους οι οποίες είναι άγονες οπότε δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για αγροτικές καλλιέργειες και παραγωγή τροφίμων. Οπότε, σε αντίθεση με τις υπόλοιπες ανταγωνιστικές πηγές για την παραγωγή βιοντίζελ, τα μικροφύκη, δεν αποτελούν ανταγωνιστές των εκτάσεων καλλιέργειας των τροφίμων, αποφεύγοντας με αυτόν τον τρόπο το δίλημμα: τρόφιμα ή καύσιμα. [6][7]

v. Ιστορική εξέλιξη της παραγωγής βιοντίζελ από μικροφύκη

Η πρώτη χρήση φυκών από τον άνθρωπο δρομολογείται πριν 2000 χρόνια στην Αρχαία Κίνα όπου οι κάτοικοι χρησιμοποιούσαν το είδος *Nostoc* για να επιβιώσουν κατά τις περιόδους του λιμού. Παρόλα αυτά η μελέτη των μικροφυκών ως προς την φυσιολογία αυτών ξεκίνησε στα τέλη του 19^{ου} αιώνα και ως προς τη βιοτεχνολογία στα μέσα του 20^{ου} αιώνα. [8]

Το έτος 1890 ο Beijerinck πραγματοποίησε την πρώτη καλλιέργεια ενός μόνο είδους μικροφύκου (ομοιόμορφη καλλιέργεια). Το είδος αυτό ήταν το *Chlorella vulgaris*. Τέτοιες καλλιέργειες χρησιμοποιήθηκαν αρχικά για τη μελέτη της φυσιολογίας των φυτών, όπως το 1919 στο Warburg της Γερμανίας, αλλά η μαζική καλλιέργεια των μικροφυκών ξεκίνησε μετά το 1948 στο πανεπιστήμιο Stanford των Ηνωμένων Πολιτειών, το Essen της Γερμανίας και το Τόκιο της Ιαπωνίας με τις αντίστοιχες μελέτες να συνοψίζονται στο βιβλίο του Burlew (1953). Αξιοσημείωτη σε αυτό το σημείο είναι η πρώτη πιλοτική μονάδα ανάπτυξης μικροφυκών σε μία ταράτσα στο πανεπιστήμιο MIT των Ηνωμένων Πολιτειών το 1951 από την εταιρία του Arthur D. Little (Arthur D. Little Inc.) με χρήση του στελέχους *Chlorella pyrenoidosa*, με σκοπό τη συνεχή ανάπτυξη των μικροφυκών, τη μελέτη των συνθηκών της ανάπτυξης αυτής, την αποτίμηση της οικονομικής βιωσιμότητας ενός παρόμοιου έργου και της χρήσης των προϊόντων της καλλιέργειας. Η εν λόγω καλλιέργεια απεικονίζεται στην εικόνα 1. [9][10]



Εικόνα III.1.2 [10]

Περίπου τις τελευταίες επτά δεκαετίες εκπονούνται έρευνες και αντίστοιχες μελέτες για την επεξεργασία των μικροφυκών και τις χρήσεις τους σε διάφορες βιοτεχνολογικές εφαρμογές. Στις αρχές της δεκαετίας του 1950, τα φύκια εμφανίστηκαν ως η ιδανική λύση για την καταπολέμηση της ανεπαρκούς ποσότητας πρωτεϊνών σε συνδυασμό με την κατακόρυφη αύξηση του παγκόσμιου πληθυσμού. Επίσης, εκείνη την εποχή ξεκίνησαν και οι πρώτες μελέτες για τις βιολογικά ενεργές ουσίες και τη χρήση τους ως αντιβιοτικά. Επίσης, ενδιαφέρον παρουσιάστηκε στην χρήση τους ως φωτοσυνθετικοί εναλλάκτες αερίων στις αποστολές στο διάστημα. [8]

Η πρώτη καλλιέργεια σε μεγάλη κλίμακα αναπτύχθηκε στις αρχές της δεκαετίας του 1960 στην Ιαπωνία από την Nihon Chlorella, ο οποίος ασχολήθηκε με το είδος *Chlorella*. Το ενδιαφέρον της χρήσης των μικροφυκών ως εναλλακτική πηγή ενέργειας αυξήθηκε κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 1970 λόγω της πρώτης πετρελαϊκής κρίσης. Στην αρχή της δεκαετίας του 1970 πραγματοποιείτο συλλογή και καλλιέργεια του είδους *Arthrospira* στο εργοστάσιο της Sosa Texcoco S.A. στη λίμνη Texcoco της πόλη του Μεξικού. Μέχρι το 1980 υπήρχαν 46 μονάδες παραγωγής μικροφυκών στην Ασία οι οποίες παρήγαγαν περισσότερα από 1000 kg μικροφυκών σε μηνιαία βάση (κυρίως *Chlorella*). Η παραγωγή του μικροφύκου *Dunaliella salina*, ως πηγή β-καροτίνης, αναπτύχθηκε στην Αυστραλία το 1986 από τις εταιρίες Western Biotechnology και Betatene (πλέον Cognis Nutrition and Health). Την ίδια εποχή ξεκίνησε η παραγωγή των μικροφυκών από εταιρίες στο Ισραήλ και τις Ηνωμένες Πολιτείες, καθώς και η παραγωγή κυανοβακτηρίων (blue-green algae) στην Ινδία. Πρόσφατα, αρκετές μονάδες παραγωγής του μικροφύκου *Haematococcus pluvialis* σε μεγάλες ποσότητες έχουν δημιουργηθεί σε Ινδία και Ηνωμένες Πολιτείες. Το συγκεκριμένο στέλεχος αποτελεί πηγή ασταξανθίνης, η οποία χρησιμοποιείται ως χρωστική για τον χρωματισμό τω τροφίμων. [2]

Την περίοδο 1978 – 1996, το εθνικό κέντρο ανανεώσιμων πηγών ενέργειας των Ηνωμένων Πολιτειών (US National Renewable Energy Laboratory – NREL), μέσω του

προγράμματος υδάτινων ειδών (Aquatic Species Program – ASP), έθεσε σε ισχύ ένα εξειδικευμένο πρόγραμμα έρευνας και ανάπτυξης (R & D) σχετικά με τις ανανεώσιμες πηγές καυσίμων, το οποίο περιελάμβανε, εκτός των άλλων, και την παραγωγή βιοντίζελ από μικροφύκη. Ένας από τους κύριους στόχους του προγράμματος ήταν η μελέτη της βιοχημείας και της φυσιολογίας της παραγωγής λιπιδίων από λιπαρά φύκη. Την περίοδο 1987-1990 δημιουργήθηκε μία πιλοτική μονάδα δύο λιμνών, έκτασης 1000 m² έκαστη, στην πόλη Roswell, NM. Η μελέτη της μονάδας έδειξε ότι η παραγωγή βιοντίζελ από μικροφύκη είναι τεχνικά δυνατή, αλλά θα πρέπει να εξελιχθεί το πεδίο της έρευνας ώστε η παραγωγή σε αυτές να είναι σχετικά μεγάλη ώστε η μονάδα να είναι και οικονομικά βιώσιμη. Άλλος ένας στόχος του προγράμματος ήταν η παραγωγή βελτιωμένων στελεχών μικροφυκών ως αποτέλεσμα της μελέτης της γενετικής μεταβλητότητας μεταξύ μικροφυκών που έχουν απομονωθεί από την καλλιέργεια με τη χρήση κυτταρομετρίας ροής ώστε να γίνει διαλογή των μικροφυκών με το μεγαλύτερο περιεχόμενο σε λιπίδια και να ελεγχθούν οι ιοί των μικροφυκών ως φορείς γενετικών πληροφοριών. Παρόλα αυτά, ο δεύτερος στόχος υπέστη μείωση προϋπολογισμού το 1995 και σταδιακά αποσύρθηκε στα πρώτα στάδια της έρευνας. [2]

Σήμερα, η διακύμανση της τιμής του πετρελαίου, η ανάγκη για μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και η στροφή προς τις εναλλακτικές πηγές ενέργειας και καυσίμων οδηγούν σε μία κατακόρυφη αύξηση του ενδιαφέροντος της επεξεργασίας των μικροφυκών για την παραγωγή βιοντίζελ. Ήδη ορισμένες εταιρίες κατασκευάζουν αντιδραστήρες για την παραγωγή βιοντίζελ από μικροφύκη (PBRs), ενώ άλλες επικεντρώνονται στην παραγωγή βιοντίζελ μέσω της επεξεργασίας μικροφυκών. Οι εταιρίες αυτές βρίσκονται σε Ευρώπη, Ωκεανία, Ασία και Αμερική. Όσον αφορά στην παγκόσμια παραγωγή βιόμαζας από μικροφύκη σήμερα, αυτή ανέρχεται σε 5000 τόνους ξηρής βιόμαζας μικροφυκών ανά έτος και παράγει τζίρο περίπου 1.25 δισεκατομμύρια USD ανά έτος. [8]

vi. Λιπιδιακό περιεχόμενο και παραγωγικότητα μικροφυκών

Πλήθος ειδών μικροφυκών μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την συλλογή μεγάλων ποσοτήτων λιπιδίων, με αποτέλεσμα την παραγωγή αντίστοιχων ποσοτήτων ελαίων. Το, κατά μέσο όρο, λιπιδιακό περιεχόμενο ποικίλλει 1-70%, όμως υπό ορισμένες συνθήκες, είδη μικροφυκών μπορούν να φτάσουν το 90% του ξηρού βάρους. [2]

Στον πίνακα 1 παρουσιάζονται ορισμένα σημαντικά στοιχεία για διάφορα είδη μικροφυκών του γλυκού νερού και της θάλασσας, όπως το λιπιδιακό περιεχόμενο καθώς και η παραγωγικότητα τους σε λιπίδια και βιόμαζα. [2]

Το λιπιδιακό περιεχόμενο των μικροφυκών μπορεί να φτάσει το 75% κατά βάρος ξηρής βιόμαζας, όμως χωρίς μεγάλες τιμές παραγωγικότητας στα αντίστοιχα είδη, όπως για παράδειγμα το *Botryococcus braunii*. Τα πιο συνήθη είδη φυκών, όπως *Chlorella*, *Cryptocodinium*, *Cylindrotheca*, *Dunaliella*, *Isochrysis*, *Nannochloris*, *Nannochloropsis*, *Neochloris*, *Nitzschia*, *Phaeodactylum*, *Porphyridium*, *Schizochytrium* και *Tetraselmis* έχουν μικρό λιπιδιακό περιεχόμενο (μεταξύ 20% και 50%), όμως η παραγωγικότητα τους σε λιπίδια και βιόμαζα παρουσιάζει υψηλές τιμές συγκριτικά με είδη που παρουσιάζουν υψηλό λιπιδιακό περιεχόμενο όπως το *Botryococcus braunii*. [2]

Το είδος *Chlorella* αποτελεί μία πολύ καλή επιλογή για την καλλιέργεια του με σκοπό την παραγωγή βιοντίζελ. Αυτό συμβαίνει διότι, αν και αρκετά είδη έχουν ανάλογες τιμές περιεχόμενου σε λιπίδια και παραγωγικότητας σε λιπίδια και βιόμαζα, υπάρχουν και άλλοι παράγοντες οι οποίοι λαμβάνονται υπόψη κατά την επιλογή του κατάλληλου είδους μικροφύκους για την παραγωγή βιοντίζελ. Για παράδειγμα, η ικανότητα του μικροφύκους

να αναπτύσσεται χρησιμοποιώντας τα παρεχόμενα θρεπτικά συστατικά και υπό πληθώρα διαφορετικών συνθηκών, οι οποίες δεν ευνοούν την ανάπτυξη άλλων ειδών μικροφυκών με ικανά ποσά περιεχόμενου σε λιπίδια και παραγωγικότητας σε λιπίδια και βιόμαζα για την παραγωγή βιοντίζελ. [2]

Άλλη μία σημαντική παράμετρος, για την επιλογή του κατάλληλου είδους, είναι η σύσταση του μικροφύκου σε λιπαρά οξέα, επειδή τα τελευταία συνδέονται άμεσα με τα χαρακτηριστικά του παραγόμενου βιοντίζελ. Αυτά αποτελούνται από κορεσμένα και μη κορεσμένα λιπαρά οξέα, τα οποία περιέχουν από 12 έως 22 άτομα άνθρακα, με ορισμένα να ανήκουν στις οικογένειες των ω-3 και ω-6 λιπαρών οξέων. Αναλύσεις, οι οποίες πραγματοποιήθηκαν σε επτά είδη μικροφυκών του γλυκού νερού, έδειξαν ότι αυτά συνθέτουν λιπαρά οξέα με αναλογίες αριθμού ατόμων άνθρακα προς αριθμό ακόρεστων δεσμών (C:D) ίσες με C14:0, C16:0, C18:1, C18:2, C18:3. Ακόμη, η «σχετική ένταση» (relative intensity) των υπολοίπων αλυσίδων λιπαρών οξέων εξαρτάται από το είδος του μικροφύκου που χρησιμοποιείται, για παράδειγμα οι αλυσίδες C16:4 και C18:4 εμφανίζονται εντονότερα στο *Ankistrodesmus sp.*, οι C18:4 και C22:6 στο *Isochrysis sp.*, οι C16:2, C16:3 και C20:5 στο *Nannochloris sp.* και οι C16:2, C16:3 και C20:5 στο *Nitzschia sp.* [2]

Επίσης, η σύσταση των λιπαρών οξέων επηρεάζεται και από διάφορους άλλους παράγοντες, όπως οι συνθήκες υπό τις οποίες αναπτύσσεται η καλλιέργεια, οι φάσεις τις οποίες ακολουθεί η ανάπτυξη των μικροφυκών, καθώς και διάφοροι παράγοντες οι οποίοι σχετίζονται με τα θρεπτικά συστατικά για την ανάπτυξη της καλλιέργειας και ορισμένοι περιβαλλοντικοί παράγοντες. Για παράδειγμα, η έλλειψη αζώτου και η ένταση των αλάτων (salt stress) προκάλεσαν τη συσσώρευση λιπαρών οξέων C18:1 σε όλα τα εξεταζόμενα είδη, ενώ στο είδος *Botryococcus braunii* υπήρχε ταυτόχρονα συσσώρευση C20:5 στο σύστημα.

Παρά το γεγονός ότι τα παραγόμενα έλαια από την καλλιέργεια μικροφυκών εξαρτώνται από το στέλεχος το οποίο χρησιμοποιείται, η χρήση μικροφυκών προτιμάται από τις καλλιέργειες φυτικών ελαίων, όπως φαίνεται και στον πίνακα 2, όπου συγκρίνονται οι αποδοτικότητες της παραγωγής βιοντίζελ, σε σχέση με το απαιτούμενο έδαφος για την καλλιέργεια των μικροφυκών σε άμεση σύγκριση με αυτές των φυτικών ελαίων. [2]

Σύμφωνα με τα στοιχεία του πίνακα 2, παρότι το περιεχόμενο σε έλαια δεν διαφέρει σημαντικά μεταξύ των δύο κατηγοριών, διακρίνονται μεγάλες διαφορές στις παραγωγικότητες σε έλαια και βιόμαζα, γεγονός το οποίο δίνει σαφές πλεονέκτημα στην καλλιέργεια μικροφυκών για την παραγωγή βιοντίζελ. Ακόμη, λόγω της υψηλής παραγωγικότητας των μικροφυκών σε βιόμαζα και έλαια, απαιτείται αρκετά μικρότερη έκταση για την καλλιέργειά τους, συγκριτικά με τα φυτικά έλαια. [2]

Μελλοντικές Τεχνολογίες - Γενετική Τροποποίηση

Η γενετική μηχανική αποτελεί ένα κομμάτι της σύγχρονης βιοτεχνολογίας η οποία βρίσκει εφαρμογή, εκτός των άλλων, και στα μικροφύκη. Κατά τη δεκαετία του 1960, τα κυανοβακτήρια επιλέγονταν ως η κατάλληλη βάση πειραματικών μελετών της εν λόγω τεχνολογίας. Επίσης, το πράσινο φύκος *Chlamydomonas reinhardtii* χρησιμοποιήθηκε σε αρκετές μελέτες μοριακής και γενετικής φυκολογίας. Παρόλα αυτά, οι μελέτες της γενετικής μηχανικής, πλέον, έχουν επικεντρωθεί στα διάτομα (diatoms) και άλλα μικροφύκη που παρουσιάζουν ενδιαφέρον από πλευράς βιομηχανικής παραγωγής. [11]

Ήδη έχει δημιουργηθεί μία εκτενής βάση δεδομένων των γονιδιακών ακολουθιών που περιέχονται στο γενετικό υλικό, το οποίο βρίσκεται στον πυρήνα, στα μιτοχόνδρια και στους χλωροπλάστες αρκετών μικροφυκών. Πιο συγκεκριμένα, έχει επιτευχθεί η χαρτογράφηση των γονιδίων του πυρηνικού γενετικού υλικού για τα στελέχη *C. reinhardtii*,

Phaeodactylum tricornutum, *Thalassiosira pseudonana*, *Cyanidioschyzon merolae*, *Ostreococcus lucimarinus*, *Ostreococcus tauri* και *Micromonas pusilla*. Σε εξέλιξη βρίσκεται η χαρτογράφηση των γονιδίων μικροφυκών, τα οποία παρουσιάζουν ενδιαφέρον σε βιομηχανικές εφαρμογές όπως *Botryococcus braunii*, *Chlorella vulgaris*, *Dunaliella salina* καθώς και των στελεχών *Fragilariopsis cylindrus*, *Pseudo-nitzschia*, *Thalassiosira rotula*, *Micromonas pusilla*, *Galdieria sulphuraria*, *Porphyra purpurea*, *Volvox carteri* και *Aureococcus anophagefferrens*. [12] [13]

Σήμερα, το NREL (National Renewable Energy Laboratory) των Ηνωμένων Πολιτειών έχει επιτύχει τη γενετική τροποποίηση μικροφυκών, τα οποία ανήκουν κυρίως στην κατηγορία των διατόμων (diatoms). Με εφαρμογή αυτής της τεχνολογίας, η αύξηση του λιπιδιακού περιεχομένου των μικροφυκών μπορεί να οδηγήσει σε τιμές του τελευταίου, μεγαλύτερες του 60% ξ.β. σε εργαστηριακό επίπεδο και 40% ξ.β. σε επίπεδο καλλιέργειας σε εξωτερικές συνθήκες. Η αύξηση του λιπιδιακού περιεχομένου των μικροφυκών οφείλεται, κυρίως, σε αυξημένη έκφραση του γονιδίου από το οποίο παράγεται η καρβοξυλάση του acetyl-coA (acetyl-coA carboxylase - ACC), το οποίο έχει σημαντικό ρόλο στη ρύθμιση του επιπέδου αφομοίωσης των λιπιδίων από τα μικροφύκη, αφού καταλύει την μετατροπή του ακετυλοσυνενζύμου A (acetyl-coenzyme A - CoA) σε malonyl-CoA. Η δράση αυτή θεωρείται ότι αποτελεί το πρώτο βήμα στην σύνθεση των λιπαρών οξέων σε πολλούς οργανισμούς. Η αυξημένη έκφραση του γονιδίου αυτού (*acc1*) σε ένζυμα είναι αποδοτική στην περίπτωση των μικροφυκών, όμως εργαστηριακά πειράματα έδειξαν ότι η γενετική τροποποίηση μόνο με αυτό το γονίδιο, ίσως να μην είναι αρκετή για την σημαντική αύξηση της αφομοίωσης των λιπιδίων από τα μικροφύκη. Άλλη μία περίπτωση η οποία παρουσίασε παρόμοια αποτελέσματα, έπειτα από εργαστηριακές μελέτες, ήταν εκείνη αύξησης της έκφρασης του γονιδίου από το οποίο συντίθεται η συνθάση KASIII (3-ketoacyl-acyl-carrier protein synthase III), αφού δεν παρουσίασε αύξηση ούτε στην παραγωγικότητα των λιπιδίων ούτε στο λιπιδιακό περιεχόμενο των μικροφυκών. [11] [14]

Από την άλλη πλευρά, προσπάθειες, οι οποίες επικεντρώθηκαν στην αύξηση της έκφρασης των γονιδίων που λαμβάνουν μέρος στη σύνθεση των τριγλυκεριδίων (TAGs) απέφεραν θετικά αποτελέσματα όσον αφορά στην παραγωγή λιπιδίων από τα μικροφύκη. Ειδικότερα, η αυξημένη έκφραση μίας δεϋδρογονάσης, της G3PDH (glycerol-3-phosphate dehydrogenase), η οποία καταλύει τη σύνθεση του glycerol-3-phosphate, το οποίο απαιτείται από τη σύνθεση των τριγλυκεριδίων. Η αύξηση του ενζύμου αυτού επιτεύχθηκε στο στέλεχος *B. parvus* και οδήγησε σε αύξηση του λιπιδιακού περιεχομένου αυτού κατά 40%. Ακόμη η αυξημένη έκφραση και άλλων ενζύμων, τα οποία εμπλέκονται στη σύνθεση των τριγλυκεριδίων, όπως glycerol-3-phosphate acyltransferase, lysophosphatidic acid acyltransferase και diacylglycerol acyltransferase (DAGAT), οδηγεί στην αύξηση του λιπιδιακού περιεχομένου των μικροφυκών. Επίσης, έχουν προταθεί τεχνικές αναστολής του καταβολισμού των λιπιδίων για την αύξηση του λιπιδιακού περιεχομένου των μικροφυκών, όμως κάτι το οποίο θα έχει αρνητικό αντίκτυπο στον πολλαπλασιασμό των κυττάρων και, συνεπακόλουθα, στην παραγωγικότητα των μικροφυκών [13]

Τέλος, όλες οι τεχνικές που αναφέρθηκαν παραπάνω χρειάζονται διερεύνηση σε βάθος, ώστε να είναι δυνατή η διασφάλιση της ομαλής λειτουργίας των κυττάρων έπειτα από τη γενετική τροποποίηση τους καθώς και η αποτίμηση της βιωσιμότητας της εφαρμογής μίας αντίστοιχης λογικής στη βιομηχανική παραγωγή.

vii. Στόχοι της Καλλιέργειας Μικροφυκών

Η καλλιέργεια των μικροφυκών έχει ως στόχο την παραγωγή πληθώρας προϊόντων σε μία μονάδα βιοδιύλιση. Αυτά τα προϊόντα είναι κυρίως το βιοντίζελ, οι τροφές για τον άνθρωπο, οι ζωοτροφές, οι χρωστικές, τα ω-3 λιπαρά οξέα, η γλυκερίνη και ορισμένα προϊόντα υψηλής αξίας όπως χημικές ενώσεις και καλλυντικά. Παρακάτω αναλύονται οι κατηγορίες αυτές σε μεγαλύτερο βάθος, ώστε να αποτιμηθεί η βιωσιμότητα της μονάδας και οι αναγκαίες ρυθμίσεις στην παραγωγική διαδικασία ανάλογα με το προϊόν, ή τα προϊόντα, που αυτή έχει ως τελικό στόχο.

a. Βιοντίζελ

Γενικά για το Βιοντίζελ

Το βιοντίζελ αποτελεί τον μονοαλκυλικό εστέρα μίας μακράς αλυσίδας λιπαρών οξέων τα οποία προέρχονται από ανανεώσιμες πηγές όπως έλαια φυτικών και ζωικών οργανισμών. Το εν λόγω βιοκαύσιμο συντίθεται από μεθυλεστέρες λιπαρών οξέων (Fatty Acid Methyl Esters – FAMES), οι οποίοι προέρχονται από την μετεστεροποίηση των τριγλυκεριδίων, που εξάγονται από τους φυτικούς οργανισμούς, με μεθανόλη, κυρίως, ή με ορισμένες άλλες αλκοόλες που θα αναφερθούν στη συνέχεια. Το παραγόμενο καύσιμο έχει χαρακτηριστικά παρόμοια με αυτά του συμβατικού ντίζελ, πετρελαϊκής προέλευσης. Τα κύρια πλεονεκτήματα του βιοντίζελ είναι η ανανεωσιμότητα του καυσίμου, η απουσία τοξικότητας και η βιοαποικοδομησιμότητα του. Οι συνήθεις πηγές για την παραγωγή βιοντίζελ αποτελούνται από φυτικούς οργανισμούς (σόγια, φοινικέλαιο, καλαμπόκι, ελαιοκράμβη κ.α.) και από μικροφύκη. Επίσης, μεγάλα πλεονεκτήματα του βιοντίζελ αποτελούν η δυνατότητα άμεσης χρήσης του στους υπάρχοντες κινητήρες, χωρίς περαιτέρω μετατροπές και η δυνατότητα ανάμιξης του με το πετρελαϊκό ντίζελ σε οποιαδήποτε αναλογία. Ακόμη, η λειτουργία των εν λόγω κινητήρων με βιοντίζελ έχει ως αποτέλεσμα την εκπομπή μικρότερων ποσοτήτων μονοξειδίου του άνθρακα (CO) και άκαυστων υδρογονανθράκων, λόγω ατελούς καύσης, καθώς και σωματιδίων και τοξικών αερίων στην ατμόσφαιρα. [4] [15] [16]

Προδιαγραφές Βιοντίζελ

Οι προδιαγραφές για το βιοντίζελ έχουν ως στόχο την ομαλή λειτουργία του κινητήρα, δηλαδή την αποφυγή της φθοράς αυτού από το καύσιμο, καθώς και την απαιτούμενη απόδοση του καυσίμου. [15]

Πρώτον, πρέπει να ελέγχεται το ιξώδες του τελικού προϊόντος, αφού των μεθυλεστέρων των λιπαρών οξέων (FAMES) μπορεί να φτάσει σε υψηλά επίπεδα. Οπότε το ιξώδες του βιοντίζελ πρέπει να βρίσκεται στην περιοχή των προδιαγραφών για το πετρελαϊκό ντίζελ. Δεύτερον, η θερμοκρασία έναρξης καύσης του βιοντίζελ πρέπει να είναι υψηλότερη εκείνης του συμβατικού ντίζελ για την διασφάλιση της ασφαλούς μεταφοράς του πρώτου. Η τρίτη προδιαγραφή αναφέρεται στο Cold Filter Plugging Point (CFPP), το οποίο αποτελεί έναν δείκτη συμπεριφοράς του καυσίμου σε χαμηλές θερμοκρασίες λειτουργίας και χρησιμοποιείται για την διασφάλιση της ομαλής ροής του καυσίμου υπό αυτές τις συνθήκες. Η επόμενη προδιαγραφή αφορά στον αριθμό κετανίου, ο οποίος συνδέεται με τα χαρακτηριστικά ανάφλεξης του καυσίμου και είναι ανάλογος της ποιότητας των χαρακτηριστικών αυτών. Το βιοντίζελ έχει μεγαλύτερο αριθμό κετανίου από

το πετρελαϊκό ντίζελ, οπότε και καλύτερη απόδοση στην καύση. Ο αριθμός εξουδετέρωσης (neutralization number) του καυσίμου αποτελεί άλλη μία προδιαγραφή με την οποία οφείλει να συμμορφώνεται το παραγόμενο βιοντίζελ. Η ύπαρξη αυτής της προδιαγραφής διασφαλίζει την ομαλή γήρανση ή/και την ποιότητα της παραγωγικής διαδικασίας αυτού, διότι αντικατοπτρίζει την παρουσία ελεύθερων λιπαρών οξέων (Free Fatty Acids – FFA) ή των οξέων που χρησιμοποιούνται στην παραγωγή του βιοντίζελ και την αποδόμηση αυτού λόγω θερμικών φαινομένων. Άλλη μία προδιαγραφή αναφέρεται στο υπόλειμμα άνθρακα του καυσίμου που υποδεικνύει την τάση εναπόθεσης άνθρακα αυτού. Αυτή η προδιαγραφή είναι πιο σημαντική στο βιοντίζελ, συγκριτικά με το συμβατικό ντίζελ, διότι σχετίζεται άμεσα με την παρουσία ελεύθερων λιπαρών οξέων, γλυκεριδίων, σαπώνων, πολυμερών, ακόρεστων λιπαρών οξέων και ανόργανων συστατικών. Τέλος, ο έλεγχος της παρουσίας των αλκοολών και των μονο-, δι- και τριγλυκεριδίων στο βιοντίζελ είναι απαραίτητος διότι υψηλά επίπεδα αυτών προκαλούν βλάβες στα μηχανικά μέρη του κινητήρα. [15]

Οι προδιαγραφές αυτές παρουσιάζονται συνοπτικά στον επόμενο πίνακα.

Φυσικές Ιδιότητες του Βιοντίζελ	
Ιδιότητα	Βιοντίζελ
Χημική Ονομασία	Μεθυλεστέρας (ή Αιθυλεστέρας) Λιπαρών Οξέων
Εύρος Χημικών Τύπων	C ₁₄ -C ₂₄ Μεθυλεστέρες ή C ₁₅₋₂₅ H ₂₈₋₄₈ O ₂
Εύρος Κινηματικών Ιξωδών (mm ² /s στους 313 K)	3.3-5.2
Εύρος Σημείων Ζέσεως (K)	860-894
Εύρος Σημείου Ανάφλεξης (K)	> 457
Εύρος Θερμοκρασιών Απόσταξης (K)	420-600
Τάση Ατμών (mm Hg, στους 295 K)	470-600
Διαλυτότητα στο νερό	< 5
Φυσική Εμφάνιση	Κίτρινο (όλες οι αποχρώσεις), καθαρό υγρό
Οσμή	
Βιοαποικοδομησιμότητα	Μεγαλύτερη του πετρελαϊκού ντίζελ
Δραστικότητα	Σταθερό (προτιμάται αποφυγή ισχυρών οξειδωτικών παραγόντων)

Πίνακας III.1.3 [17]

Προδιαγραφές ASTM για το Βιοντίζελ και το Πετρελαϊκό Ντίζελ

Ιδιότητα	Μέθοδος Δοκιμής	ASTM D975 (Πετρελαϊκό Ντίζελ)	ASTM D6751 (Βιοντίζελ)
Σημείο Ανάφλεξης (Κ)	D 93	>= 325	403
Νερό και Ίζημα (% κ.ο.)	D 2709	<= 0.05	<= 0.05
Κινηματικό Ιξώδες (mm ² /s στους 313 Κ)	D 445	1.3- 4.1	1.9-6.0
Θεική Τέφρα (Sulfated Ash) (% κ.β.)	D 874	-	<= 0.02
Συνολική Τέφρα (% κ.β.)	D 482	<= 0.01	-
Θείο (S) (% κ.β.)	D 5453	<= 0.05	-
Θείο (S) (% κ.β.)	D 2622/1 29	-	<= 0.05
Διάβρωση Ταινίας Χαλκού (Copper Strip Corrosion)	D 130	No. 3 (ή μικρότερο)	No. 3 (ή μικρότερο)
Αριθμός Κετανίου (CN)	D 613	>= 40	>= 47
Αρωματικότητα (% κ.ο.)	D 1319	<= 35	-
Υπόλειμμα Άνθρακα (% κατά μάζα)	D 4530	-	<= 0.05
Υπόλειμμα Άνθρακα (% κατά μάζα)	D 524	<= 0.35	-
Θερμοκρασία Απόσταξης (90% ανενέωση όγκου) (Κ)	D 1160	555-611	-

Πίνακας III.1.4 [18]

Αποθήκευση Βιοντίζελ

Η σταθερότητα του βιοντίζελ κατά την αποθήκευση του αποτελεί ένα από τα κύρια χαρακτηριστικά της ποιότητας αυτού. Τα παράγωγα των φυτικών ελαίων έχουν μία τάση να υποβαθμίζονται μέσω υδρολυτικών και οξειδωτικών αντιδράσεων. Ο βαθμός ακορεστότητας τους, τα καθιστά ευάλωτα σε θερμικό ή/και οξειδωτικό πολυμερισμό, ο οποίος μπορεί να οδηγήσει σε σχηματισμό αδιάλυτων προϊόντων, τα οποία δημιουργούν προβλήματα στο σύστημα καύσης του καυσίμου, ιδιαίτερα στην αντλία ψεκασμού. Η πλειοψηφία των χαρακτηριστικών του καυσίμου δεν επηρεάζεται κατά την αποθήκευση αυτού. Εξαιρέσεις αποτελούν το ιξώδες, ο αριθμός των υπεροξειδίων (Peroxide Value – PV) και η περίοδος επαγωγής κατά Rancimat (Rancimat Induction Period - RIP), χαρακτηριστικά τα οποία μεταβάλλονται κατά την αποθήκευση του καυσίμου ανάλογα με τη φύση του αρχικού προϊόντος. [15] [19]

Πιο αναλυτικά, στην περίπτωση του ιξώδους, πειράματα σε δείγματα βιοντίζελ αποφαίνονται ότι μόνο τα δείγματα εκείνα που αποθηκεύτηκαν με έκθεση στον Ήλιο και στο οξυγόνο υπέστησαν μεταβολές στο ιξώδες, ενώ τα υπόλοιπα δεν παρουσίαζαν αντίστοιχες μεταβολές σε χρονική περίοδο 170 ημερών. Οι μεταβολές του αριθμού των υπεροξειδίων (PV) διαφέρουν ανάλογα με το δείγμα. Για δείγματα με μικρή αρχική οξείδωση, η αύξηση του PV είναι αργή. Για δείγματα με σημαντική αρχική οξείδωση, ο PV αρχικά αυξάνεται και στη συνέχεια μειώνεται λόγω σχηματισμού δευτερευόντων

οξειδωτικών προϊόντων. Παρόλα αυτά, ο PV δεν περιέχεται στις προδιαγραφές τις οποίες πρέπει να συναντά το βιοντίζελ. Όσον αφορά στη σταθερότητα του βιοντίζελ έναντι της οξείδωσης, τα πειράματα έδειξαν ότι το προϊόν υποβαθμίζεται και γίνεται πιο ασταθές με το πέρασμα του χρόνου. Η περίοδος επαγωγής κατά Rancimat (RIP) μειώνεται με τον χρόνο, ενώ ο ρυθμός με τον οποίο γίνεται η μείωση εξαρτάται από την ποιότητα του βιοντίζελ και τις συνθήκες της αποθήκευσης. Η περίοδος επαγωγής μπορεί να αυξηθεί με χρήση ορισμένων προσθέτων τα οποία πρέπει να διασφαλίζουν τη θερμική σταθερότητα του προϊόντος για τουλάχιστον 6 μήνες. Πλεονάζουσα ποσότητα προσθέτων, που καθιστούν την περίοδο επαγωγής μεγαλύτερη των 20 ωρών είναι ανεπιθύμητη, διότι μπορεί να έχει αρνητικό αντίκτυπο σε άλλα χαρακτηριστικά του βιοντίζελ, όπως για παράδειγμα το υπόλειμμα άνθρακα. Επίσης, πρέπει να αποφεύγεται η επικοινωνία του βιοντίζελ με τον αέρα κατά την αποθήκευση του, διότι υπάρχει περίπτωση αποσταθεροποίησης του με αυτόν τον τρόπο. [15] [19] [20]

Τέλος, πειραματικές μελέτες αποθήκευσης του βιοντίζελ σε συνθήκες διάφορες των προβλεπόμενων έδειξαν ότι σε αυτήν την περίπτωση συντελούνται σημαντικές αλλαγές στη σύσταση του καυσίμου κατά την αποθήκευση. [15] [19]

b. Γλυκερίνη

Η γλυκερίνη αποτελεί ένα πολύ σημαντικό παραπροϊόν της παραγωγικής διαδικασίας, λόγω της αυξημένης παραγόμενης ποσότητας της κατά τη διάρκεια του σταδίου της μετεστεροποίησης. Η αγορά της γλυκερίνης είναι, γενικά, γνωστή και οι κυριότεροι εκπρόσωποι της είναι οι βιομηχανίες χρωμάτων και οι φαρμακοβιομηχανίες. Ακόμη, η γλυκερίνη μπορεί να χρησιμοποιηθεί άμεσα ως πρώτη ύλη για την παραγωγή χημικών ουσιών, όπως στην περίπτωση της 1,3-προπανοδιόλης μέσω μικροβιακών ενζυμικών μεθόδων, με χρήση είτε του οργανισμού *Klebsiella pneumoniae* είτε του *Clostridium butyricum*. Επιπρόσθετα, η γλυκερίνη μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην παραγωγή διάφορων χημικών ενώσεων και ουσιών όπως, το ηλεκτρικό οξύ, το προπανοϊκό οξύ, η αιθανόλη, η προπανόλη και το υδρογόνο. Επίσης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ανανεώσιμη πρώτη ύλη για την παραγωγή χημικών ουσιών, όπως το αιθυλένιο και το προπυλένιο, τα οποία, μέχρι στιγμής, παράγονται με χρήση ορυκτών πρώτων υλών. Τέλος, έσχατη, αλλά ταυτόχρονα βιώσιμη λύση, είναι η ανακυκλοφορία της γλυκερίνης στο σύστημα προς παραγωγή μεγαλύτερη ποσότητας μικροφυκών. [21] [22] [23]

Όσον αφορά στην παραγωγή της γλυκερίνης, αυτή υπολογίζεται σε 100 kg ανά παραγόμενο τόνο βιοντίζελ φυτικής προέλευσης. Όμως, το περιεχόμενο και η παραγωγικότητα των μικροφυκών σε λιπίδια είναι αυξημένο συγκριτικά με τους φυτικούς οργανισμούς, ενώ και στις δύο περιπτώσεις ακολουθούνται παρόμοιες μέθοδοι επεξεργασίας των λιπιδίων προς βιοντίζελ. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, η παραγωγή γλυκερίνης ανά τόνο βιοντίζελ από μικροφύκη να είναι μεγαλύτερη των 100 kg. [24]

c. Λιπαρά Οξέα

Οι μεγάλοι φυτικοί και οι ζωικοί οργανισμοί υποφέρουν από έλλειψη του κατάλληλου ενζύμου ώστε να είναι δυνατή η σύνθεση πολυακόρεστων λιπαρών οξέων (Polyunsaturated Fatty Acids – PUFAs) με αλυσίδες που ξεπερνούν, σε μήκος, τους 18 άνθρακες. Οπότε, αυτά πρέπει να τα λάβουν μέσω της τροφής. Τα ψάρια και τα ιχθυέλαια είναι οι κοινές πηγές πολυακόρεστων λιπαρών οξέων στην περίπτωση αυτή, όμως το τελευταίο διάστημα, ανησυχίες έχουν εγείρει οι τοξίνες που αφομοιώνονται από τα ψάρια. Όσον αφορά στα ιχθυέλαια, αυτά παρουσιάζουν ορισμένα προβλήματα κατά τη χρήση τους

ως πρόσθετα τροφίμων, λόγω της οσμής, της γεύσης και της φτωχής οξειδωτικής σταθερότητας που παρουσιάζουν. Οπότε, τα μικροφύκη που προέρχονται από τη θάλασσα μπορούν να αποτελέσουν μία νέα πηγή πολυακόρεστων λιπαρών οξέων για τους οργανισμούς αυτούς. [8]

ω-3 Λιπαρά Οξέα

Οι ευεργετικές ιδιότητες της προσθήκης τροφών με πλούσιο περιεχόμενο σε ω-3 λιπαρά οξέα είναι ευρέως γνωστές. Η παγκόσμια αγορά ω-3 λιπαρών οξέων εκτιμάται σε 7 δισεκατομμύρια USD (στοιχεία για το έτος 2008). Τα ω-3 λιπαρά οξέα μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως συστατικά ειδικών προσθέτων διατροφής (nutraceuticals) για κατανάλωση από τον άνθρωπο και ως συστατικών των ζωοτροφών. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αυτής της κατηγορίας είναι το μόνο προϊόν της καλλιέργειας των μικροφυκών, το οποίο είναι σήμερα εμπορικά διαθέσιμο. Αυτό είναι το DHA (Docosahexaenoic Acid), το οποίο έχει σημαντικό ρόλο στη σωστή ανάπτυξη του εγκεφάλου και των ματιών του ανθρώπου, σε εμβρυική κατάσταση, και την υποστήριξη της καρδιαγγειακής λειτουργίας στους ενήλικες. Σήμερα η κυριότερη πηγή των ω-3 λιπαρών οξέων είναι το ιχθυέλαιο. Όμως αυτό παρουσιάζει ορισμένα προβλήματα τα οποία αναφέρθηκαν προηγουμένως, οπότε τα μικροφύκη παρουσιάζονται ως μια πολλά υποσχόμενη πηγή για την παροχή ω-3 λιπαρών οξέων. [21] [25] [26] [27]

d. Χρήσεις της βιόμαζας των μικροφυκών

Η βιόμαζα των μικροφυκών, που μένει ως υπόλειμμα της παραγωγικής διαδικασίας, αποτελεί το κυριότερο παραπροϊόν, με βάση την παραγόμενη ποσότητα, της παραγωγής βιοντίζελ, ή άλλων βιοκαυσίμων από μικροφύκη. Η βιόμαζα των μικροφυκών είναι μία πηγή πλούσια σε πρωτεΐνες, βιταμίνες, θρεπτικά συστατικά (micronutrients) και καροτενοειδή. Οι χρήσεις της βιόμαζας των μικροφυκών, η οποία αποτελεί υπόλειμμα της παραγωγής βιοντίζελ, αφορούν στους εξής τομείς της αγοράς: ζωοτροφές, λιπάσματα, χρωστικές και παραγωγή βιοαερίου. [21]

Διάθεση των Μικροφυκών ως Τροφή

Σύσταση και Ιδιότητες Πρωτεϊνών από Μικροφύκη

Η χρήση της βιόμαζας των μικροφυκών ως τροφή οφείλεται στις πρωτεΐνες και τις βιταμίνες που περιέχονται σε αυτά. Η πλειοψηφία των βιβλιογραφικών δεδομένων όσον αφορά στο περιεχόμενο των μικροφυκών σε πρωτεΐνες, κυρίως ένζυμα, αναφέρονται σε εκτιμήσεις για την ποσότητα των λεγόμενων «ακατέργαστων» πρωτεϊνών (crude protein), οι οποίες χρησιμοποιούνται συχνά για την αξιολόγηση της διατροφικής αξίας των τροφίμων. Πιο συγκεκριμένα, η εκτίμηση των πρωτεϊνών με αυτήν τη μέθοδο προκύπτει από μέτρηση του ολικού αζώτου μέσω υδρόλυσης της βιόμαζας των μικροφυκών. Παρόλα αυτά με τη χρήση αυτής της μεθόδου γίνεται μία υπερεκτίμηση του περιεχομένου των μικροφυκών σε πρωτεΐνες, αφού εκτός από αυτές, άζωτο περιέχουν και άλλες οργανικές ενώσεις που βρίσκονται στη βιόμαζα των μικροφυκών, όπως νουκλεϊκά οξέα, αμίνες και ενώσεις που συγκροτούν το κυτταρικό τοίχωμα. Σύμφωνα με βιβλιογραφικά δεδομένα, το

ποσοστό των μη πρωτεϊνικών πηγών αζώτου στη βιομάζα των μικροφυκών ανέρχεται σε 12% για το είδος *Spirulina*, 11.5 % για το είδος *Scenedesmus obliquus* και 6 % για το είδος *Dunalliella*. [28]

Οι πρωτεΐνες αποτελούν συνθέσεις διαφορετικών αμινοξέων, ως εκ τούτου η διατροφική αξία μίας πρωτεΐνης καθορίζεται από το περιεχόμενο, τη σύσταση και τη διαθεσιμότητα των αμινοξέων αυτών.

Στον πίνακα Π.1 του παραρτήματος παρουσιάζονται τα δεδομένα για το περιεχόμενο διαφόρων ειδών μικροφυκών σε αμινοξέα, τα οποία συγκρίνονται με τιμές αναφοράς μίας καλά ισορροπημένης πρωτεΐνης, όσον αφορά στα αμινοξέα από τα οποία αποτελείται, με βάση τον οργανισμό WHO/FAO. Μετά την ανάγνωση του εν λόγω πίνακα γίνεται αντιληπτό το γεγονός ότι οι τιμές για τα αμινοξέα των μικροφυκών δεν απέχουν αρκετά από τη βάση αναφοράς.

Σε αυτό το σημείο να επισημανθεί το γεγονός ότι από τα είδη που εμφανίζονται στον παρακάτω πίνακα, λίγα είναι εκείνα τα οποία έχουν οδηγηθεί σε μαζική παραγωγή (*Chlorella sp.*, *Scenedesmus obliquus*, *Spirulina sp.*, *Athrospira sp.*).

Περιεχόμενο Μικροφυκών σε Πρωτεΐνες, Υδατάνθρακες και Λιπίδια

Είδος	Πρωτεΐνες	Υδατάνθρακες	Λιπίδια
<i>Anabaena clindrica</i>	43-56	25-30	4-7
<i>Aphanizomenon flos-aquae</i>	62	23	3
<i>Athrospira maxima</i>	60-71	13-16	6-7
<i>Botryococcus braunii</i>	4	20	86
<i>Chlamydomonas reinhardii</i>	48	17	21
<i>Chlorella ellipsoidea</i>	5	16	84
<i>Chlorella pyrenoidosa</i>	57	26	2
<i>Chlorella vulgaris</i>	51-58	12-17	14-22
<i>Dunaliella salina</i>	57	32	6
<i>Euglena gracilis</i>	39-61	14-18	14-20
<i>Porphyridium cruentum</i>	28-39	40-57	9-14
<i>Prymnesium parvum</i>	30-45	25-33	22-38
<i>Scenedesmus obliquus</i>	50-56	10-17	12-14
<i>Spirogyra sp.</i>	6-20	33-64	11-21
<i>Spirulina platensis</i>	46-63	8-14	4-9
<i>Spirulina maxima</i>	60-71	13-16	6-7
<i>Synechococcus sp.</i>	63	15	11

Πίνακας III.1.5 [28]

Διατροφική Αξία Πρωτεϊνών από Μικροφύκη

Μία ακριβής μέθοδος αξιολόγησης της ποιότητας και της θρεπτικής αξίας των πρωτεϊνών των μικροφυκών αποτελεί ο προσδιορισμός του λόγου πρωτεϊνικής απόδοσης (Protein Efficiency Ratio - PER), ο οποίος εκφράζεται στην αύξηση του βάρους ενός ζώου ανά μονάδα πρωτεΐνης που αυτό καταναλώνει σε μικρής διάρκειας δοκιμές εκτροφής. [28]

Επίσης, είναι δυνατή η χρήση ακόμη πιο εξειδικευμένων τεχνικών υπολογισμού του ισοζυγίου μάζας του αζώτου για τον προσδιορισμό της θρεπτικής αξίας μίας πρωτεΐνης. Σε αυτήν την κατηγορία ανήκει η εκτίμηση της βιολογικής αξίας (Biological Value - BV), η οποία

αποτελεί έναν υπολογισμό του δεσμευμένου αζώτου που καθορίζεται για την ανάπτυξη και τη συντήρηση των λειτουργιών ενός οργανισμού. [28]

Άλλη μία παράμετρος, η οποία καθορίζει τη θρεπτική αξία μίας πρωτεΐνης, είναι ο συντελεστής πεπτικότητας (digestibility coefficient - DC). Η καθαρή αξιοποίηση των πρωτεϊνών (Net Protein Utilization - NPU) είναι ανάλογη του γινομένου του συντελεστή πεπτικότητας (DC) με τη βιολογική αξία (BV) και αποτελεί ένα μέτρο της πεπτικότητας της πρωτεΐνης και της βιολογικής αξίας των αμινοξέων που απορροφώνται από την τροφή. Δεδομένα για αυτές τις τιμές των παραμέτρων αυτών σε διάφορα είδη παρουσιάζονται στον πίνακα Π.2 του παραρτήματος. [28]

Το κυτταρικό τοίχωμα, το οποίο αποτελείται από κυτταρίνη, ανέρχεται σε ποσοστό 10% της ξηρής βιόμαζας των μικροφυκών. Όμως, δεν υπάρχει δυνατότητα πέψης αυτού ούτε στον ανθρώπινο οργανισμό ούτε καθώς και στους φυτικούς οργανισμούς. Οπότε, κρίνεται αναγκαία η διάσπαση των κυττάρων ώστε οι πρωτεΐνες, ενδεχομένως και άλλα συστατικά της φυτικής βιόμαζας, να αποκτήσουν πρόσβαση στα ένζυμα της πέψης. Δεδομένα για τεχνικές διάσπασης των κυττάρων παρατίθενται στον πίνακα 2 του παραρτήματος. [28]

Εφαρμογές Πρωτεϊνών από Μικροφύκη

Ένα νέο είδος τροφής κρίνεται ασφαλές μετά τη διεξαγωγή τοξικολογικών αναλύσεων ώστε να αποδεικνύεται η ασφάλεια του. Αυτή η διαδικασία εφαρμόζεται ειδικότερα σε περιπτώσεις τροφών από μη συμβατικές πηγές, όπως τα μικροφύκη. Οι αναλύσεις που διεξήχθησαν με σκοπό τον προσδιορισμό των τοξικών, ή ορισμένων άλλων, χαρακτηριστικών, τα οποία κρίνονται επιβλαβή για την υγεία, έδειξαν ότι τα μικροφύκη δεν παρουσιάζουν αρνητικά αποτελέσματα κατά την αξιοποίηση τους ως τροφές. Επίσης, δεν βρέθηκαν σοβαρές ανωμαλίες ούτε κατά τα μικρής διάρκειας ούτε κατά τα μακράς διάρκειας πειράματα εκτροφής. Ακόμη, δεν παρουσιάστηκε οξεία ή χρόνια τοξικότητα στις μελέτες που διεξήχθησαν για τα μικροφύκη. Όλες οι αναλύσεις, συμπεριλαμβανομένων μελετών για τον άνθρωπο, έδειξαν ότι τα προϊόντα των μικροφυκών μπορούν να χρησιμοποιηθούν, χωρίς κανέναν κίνδυνο, ως τροφές, έπειτα από την κατάλληλη επεξεργασία τους. [28]

Συμπερασματικά, η βιόμαζα των μικροφυκών αποδεικνύεται μία πηγή πρωτεϊνών με ανταγωνιστικά χαρακτηριστικά αυτών της φυτικής προέλευσης. [28]

Μικροφύκη για Ζωοτροφές

Πρόσφατα η υπολειμματική βιόμαζα των διαδικασιών παραγωγής προϊόντων από μικροφύκη χρησιμοποιείται ως ζωοτροφή. Τοξικολογικές μελέτες και αναλύσεις των θρεπτικών συστατικών παρουσιάζουν τη βιόμαζα των μικροφυκών ως κατάλληλη για χρήση ως πρόσθετο τροφών αφού αποτελεί σημαντική πηγή πρωτεϊνών, ενώ ταυτόχρονα δεν παρουσιάζει οξεία τοξικότητα. Ακόμη, τοξικολογικές μελέτες όσον αφορά σε βαρέα μέταλλα, δεν έδειξαν ότι υπάρχει κίνδυνος κατά τη διάθεση των μικροφυκών για ζωοτροφές. Επίσης, υπάρχει η δυνατότητα πλήρους αντικατάστασης συμβατικών ζωοτροφών από μικροφύκη. Ενδεικτικές ζωοτροφές που μπορούν να αντικατασταθούν από μικροφύκη αποτελούν το σογιάλευρο, το ιχθυάλευρο και το πίτουρο του ρυζιού. Η χρήση των μικροφυκών στοχεύει στην εκτροφή κυρίως πουλερικών, χοίρων, προβάτων και ποντικών. Άλλη μία κατηγορία, η οποία μπορεί να καλύπτει τις ανάγκες της σε τροφή με τη βιόμαζα των μικροφυκών, είναι οι ιχθυοκαλλιέργειες. Τέλος, εκτιμάται ότι περίπου το 30% της παγκόσμιας παραγωγής φυκών πωλείται ως ζωοτροφή και περισσότερο από 50% της παγκόσμιας παραγωγής του είδους *Arthrospira* χρησιμοποιείται ως πρόσθετο στις ζωοτροφές. [28] [29] [8]

Τα κριτήρια υγιεινής και η συνεπακόλουθη νομοθεσία δεν είναι τόσο αυστηρή όσο στην κατανάλωση των μικροφυκών ως τροφή, ή πρόσθετο σε αυτήν, στην περίπτωση του ανθρώπου. Το κόστος στην περίπτωση σύνδεσης τους με την επεξεργασία των αποβλήτων είναι ανταγωνιστικό των υπολοίπων ζωοτροφών που χρησιμοποιούνται σήμερα, αλλά στην περίπτωση που είναι επιθυμητή καθαρή βιόμαζα οργανισμών όπως η *Spirulina* και η *Chlorella*, το κόστος αυξάνεται κατακόρυφα. [29]

Λιπαρά Οξέα

Οι μεγάλοι φυτικοί και οι ζωικοί οργανισμοί υποφέρουν από έλλειψη του κατάλληλου ενζύμου ώστε να είναι δυνατή η σύνθεση πολυακόρεστων λιπαρών οξέων (Polyunsaturated Fatty Acids – PUFAs) με αλυσίδες που ξεπερνούν, σε μήκος, τους 18 άνθρακες. Οπότε, αυτά πρέπει να τα λάβουν μέσω της τροφής. Τα ψάρια και τα ιχθυέλαια είναι οι κοινές πηγές πολυακόρεστων λιπαρών οξέων στην περίπτωση αυτή, όμως το τελευταίο διάστημα, ανησυχίες έχουν εγείρει οι τοξίνες που αφομοιώνονται από τα ψάρια. Όσον αφορά στα ιχθυέλαια, αυτά παρουσιάζουν ορισμένα προβλήματα κατά τη χρήση τους ως πρόσθετα τροφίμων, λόγω της οσμής, της γεύσης και της φτωχής οξειδωτικής σταθερότητας που παρουσιάζουν. Οπότε, τα μικροφύκη που προέρχονται από τη θάλασσα μπορούν να αποτελέσουν μία νέα πηγή πολυακόρεστων λιπαρών οξέων για τους οργανισμούς αυτούς.[8]

Μικροφύκη για Κατανάλωση από τον Άνθρωπο

Τα μικροφύκη που προορίζονται για κατανάλωση από τον άνθρωπο βρίσκονται σε ορισμένες μορφές όπως ταμπλέτες, κάψουλες και υγρά. Επίσης, μπορούν να αναμιχθούν με διάφορα τρόφιμα όπως μακαρόνια, σνακς, καραμέλες, τσίχλες και ροφήματα. Ακόμη, λόγω των χημικών ιδιοτήτων τους μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε ως πρόσθετα τροφίμων είτε ως φυσική πηγή χρωστικής για χρωματισμό των τροφίμων. Αντίστοιχες εμπορικές χρήσεις και εφαρμογές έχουν βρει τέσσερα, κυρίως, είδη μικροφυκών. Αυτά είναι: *Arthrospira*, *Chlorella*, *Dunaliella salina* και *Aphanizomenon flos-aquae*. [8]

Παρά το υψηλό περιεχόμενο σε θρεπτικές πρωτεΐνες, η ξηρή βιόμαζα των μικροφυκών δεν χρησιμοποιείται εκτενώς ως τρόφιμο ή συμπλήρωμα διατροφής. Αυτό εξηγείται από τον συνδυασμό του πολύ μικρού μεγέθους, αντίστοιχου αυτού της σκόνης, με το σκούρο πράσινο χρώμα και την οσμή η οποία είναι παρόμοια αυτής του ψαριού. Παρόλα αυτά, διεξήχθησαν ορισμένα πειράματα με τη χρήση διάφορων κοινών μεθόδων της επεξεργασίας των τροφίμων, για παράδειγμα θέρμανση, έψηση και ανάμιξη. Στόχος ήταν ο συνδυασμός προϊόντων των μικροφυκών με διάφορα τρόφιμα, όπως ψωμί και νουντλς. Στην περίπτωση του ψωμιού, μόνο μικρή ποσότητα προϊόντων μικροφυκών ήταν δυνατό να προστεθεί, αφού μετά από ένα σημείο η όψη, η γεύση και η σύσταση της ζύμης αλλοιώνονται αισθητά. Στα νουντλς, η προσθήκη μικροφυκών, πέραν μικρής ποσότητας, μετατρέπει το χρώμα τους σε καφέ. Ακόμη, διαφορετικά πειράματα έδειξαν ότι η γεύση αλλάζει και σε άλλα ζυμαρικά (ραβιόλια) με την προσθήκη παρόμοιας ποσότητας προϊόντων των μικροφυκών. Για την επίλυση των προβλημάτων αυτών είναι αναγκαία η μετεπεξεργασία των τελικών προϊόντων (τροφίμων) με μια σειρά τεχνικών, όπως λεύκανση, γαλακτωματοποίηση, ζελοποίηση, εκβολή, οι οποίες αυξάνουν σημαντικά το κόστος. [28]

Επίσης, στις υπό ανάπτυξη χώρες, στις οποίες υπάρχει αυξημένη ζήτηση πρωτεϊνών δημιουργήθηκαν προβλήματα κατά τη χρήση προϊόντων από μικροφύκη λόγω κοινωνικών και ηθικών φραγμών καθώς και αυστηρής νομοθεσίας ενάντια σε τρόφιμα προερχόμενα από μη συμβατικές πηγές και τα οποία υπόκεινται σε επεξεργασία με απόβλητα. Ακόμη, το κόστος της παραγωγικής διαδικασίας των πρωτεϊνών από μικροφύκη δεν μπορεί να ανταγωνιστεί αυτό των συμβατικών πρωτεϊνικών πηγών. [28]

Επιπρόσθετα, τα μικροφύκη, η *Chlorella* στην περίπτωση αυτή, είναι πλούσια, εκτός των πρωτεϊνών, σε βιταμίνες και άλλους παράγοντες ανάπτυξης του ανθρώπινου οργανισμού. Παρόλα αυτά, το υψηλό περιεχόμενο των μικροφυκών σε νουκλεϊκά οξέα περιορίζει τη μέγιστη επιτρεπόμενη προς κατανάλωση από τον άνθρωπο ποσότητα σε 5% των συνολικών ημερήσιων αναγκών αυτού σε τροφή. [29]

Άλλος ένας παράγοντας προς εξέταση στη διάθεση των μικροφυκών ως τροφή για τον άνθρωπο είναι η εύκολη πέψη των τελευταίων από τον ανθρώπινο οργανισμό και η θρεπτική τους αξία. Για αυτόν τον λόγο, κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας τους, αν ένας από τους στόχους της παραγωγής είναι και η διάθεση τους ως τροφή για τον άνθρωπο, επιβάλλεται η διάσπαση του κυτταρικού τοιχώματος μέσω ξήρανσης. Όμως λόγω του αυξημένου κόστους του σταδίου αυτού ταυτόχρονα με την αμφιβολία της κοινωνικής αποδοχής, η όλη διαδικασία κρίνεται ασύμφορη και η εύρεση εναλλακτικών μεθόδων επεξεργασίας των μικροφυκών για την διάθεση τους ως τροφή για τον άνθρωπο αποτελεί επιτακτική ανάγκη ώστε να αυξηθεί η βιωσιμότητα της μονάδας. [29]

Πειραματικές μελέτες που εκπονήθηκαν σε μικροφύκη, ειδικότερα στο στέλεχος *C. vulgaris*, έδειξαν ότι η βιόμαζα των μικροφυκών μετά την ανάπτυξη τους δεν παρουσίαζε τοξικολογικούς κινδύνους. Πιο συγκεκριμένα, οι παθογόνοι μικροοργανισμοί και τα βακτήρια που προέρχονται από τα θρεπτικά συστατικά για τα μικροφύκη, κυρίως τις απορροές των βιολογικών καθαρισμών, εξουδετερώνονται κατά τη διάρκεια των επόμενων σταδίων της επεξεργασίας των μικροφυκών. Σε αυτό το πλαίσιο, τα μικροφύκη μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως παγίδα τοξικών ιόντων και μορίων. [6] [29]

Διάθεση των Μικροφυκών ως Λίπασμα

Άλλη μία κατηγορία χρήσης των μικροφυκών αποτελεί η διάθεση τους ως οργανικό λίπασμα αφού έχουν δεσμεύσει ικανοποιητικές, για αυτήν τη λειτουργία, ποσότητες αζώτου και φωσφόρου τα οποία χρησιμοποιούνται ως θρεπτικά συστατικά για την ανάπτυξη της καλλιέργειας τους. Επίσης, η εναπομείνασα ποσότητα των μικροφυκών που δεν καταναλώθηκε από τις ιχθυοκαλλιέργειες, μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην γεωργία για την παραγωγή αραβοσίτου. Τέλος, μελέτες, σε βιομηχανική κλίμακα, έδειξαν ότι 1 kg μικροφυκών που χρησιμοποιείται ως λίπασμα μπορεί να αντικαταστήσει 60 kg συμβατικού λιπάσματος αζώτου. [29]

e. Χρήσεις των Μικροφυκών σε Προϊόντα Υψηλής Αξίας

Γενικές Χρήσεις Μικροφυκών σε Προϊόντα Υψηλής Αξίας

Τα μικροφύκη μπορούν να χρησιμοποιηθούν στη βιομηχανία των καλλυντικών, ειδικότερα τα είδη *Arthrospira* και *Chlorella*, και στην παραγωγή μορίων υψηλής προστιθέμενης αξίας όπως λιπαρά οξέα, χρωστικές και σταθερά βιοχημικά ισότοπα. Για την παραγωγή των προηγούμενων, ως παραπροϊόντα της επεξεργασίας των μικροφυκών που έχει ως πρωταρχικό στόχο την παραγωγή βιοντίζελ, αποτελεί επιτακτική ανάγκη ο αυξημένος καθαρισμός κατά την επεξεργασία των μικροφυκών και η επίτευξη αυξημένων αποδόσεων κατά την εξαγωγή των λιπιδίων. [8] [29]

Χρωστικές

Οι χρωστικές που αποτελούν προϊόντα της καλλιέργειας των μικροφυκών διαχωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες ουσιών στις οποίες ανήκουν. Οι κατηγορίες αυτές είναι τα καροτενοειδή (carotenoids) και οι φυκοβιλιπρωτεΐνες (Phycobiliproteins). Όμως, εκτός από τις χρωστικές, οι κατηγορίες αυτές περιλαμβάνουν ουσίες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν και σε άλλες εφαρμογές, όπως τα αντιοξειδωτικά, τα καλλυντικά, η υγεία και τα φάρμακα. [8]

Τα καροτενοειδή (carotenoids), κυριότεροι εκπρόσωποι των οποίων είναι η β-καροτίνη (β-carotene) και η ασταξανθίνη (astaxanthin), μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως φυσικές χρωστικές στα τρόφιμα. Στην παγκόσμια αγορά των βαφών, τα καροτενοειδή αποτελούν ανταγωνιστικά προϊόντα των συνθετικών βαφών, με τα τελευταία να έχουν αρκετά χαμηλότερο κόστος παραγωγής, αλλά τα καροτενοειδή έχουν το πλεονέκτημα της παροχής φυσικών ισομερών. Το φυσικό ισομερές της β-καροτίνης είναι ισχυρότερο από όλες τις μορφές συνθετικών ισομερών. Το στέλεχος *Dunaliella salina*, αποτελεί την κυριότερη πηγή β-καροτίνης σήμερα, αφού αυτή μπορεί να παραχθεί σε ποσοστό έως και 14% του βάρους της ξηρής βιόμαζας αυτού, ενώ για την ασταξανθίνη κυριότερη πηγή αποτελεί το στέλεχος *Haematococcus pluvialis*, το οποίο παρουσιάζει παραγωγή ασταξανθίνης σε ποσοστό από 1.5% έως 3% του βάρους της ξηρής βιόμαζας αυτού. [8]

Άλλη μία κατηγορία προϊόντων από μικροφύκη αποτελούν οι φυκοβιλιπρωτεΐνες (Phycobiliproteins) που παράγονται κυρίως από τα είδη *Arthrospira* και *Porphyridium*. Αυτές χρησιμοποιούνται κυρίως ως φυσικές βαφές, για παράδειγμα στα τρόφιμα στην περίπτωση της φυκοκυανίνης (phycocyanin) και ως φυσικά καλλυντικά. Επίσης, χρησιμοποιούνται στον τομέα της υγείας, ως αντιδραστήρια σε εργαστήρια πρόληψης ασθενειών. [8]

Καλλυντικά

Στη βιομηχανία των καλλυντικών βρίσκουν εφαρμογές, κυρίως, τα είδη *Arthrospira* και *Chlorella*. Αυτές οι εφαρμογές αφορούν κυρίως σε κρέμες, αντηλιακά και σαμπουάν, από την επεξεργασία των πρωτεϊνών καθώς και άλλων ουσιών, υψηλής αξίας, που εξάγονται από τα μικροφύκη. Τελευταία στα μικροφύκη που βρίσκουν εφαρμογές στα καλλυντικά, κυρίως λόγω των εξαγωγίμων προϊόντων αυτών, έχουν προστεθεί τα στελέχη *Nannochloropsis oculata* και *Dunaliella salina*. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι ορισμένες εταιρίες, της εν λόγω βιομηχανίας, έχουν επενδύσει σε δικές τους καλλιέργειες μικροφυκών, κυρίως στην περιοχή της Γαλλίας. [8]

Φάρμακα

Άλλη μία κατηγορία όπου τα μικροφύκη μπορούν να βρουν εφαρμογή είναι η βιομηχανία των φαρμάκων, λόγω των καροτενοειδών, όπως η β-καροτίνη, η οποία δρα ως αντικαρκινικός παράγοντας. Επίσης, εργαστηριακές μελέτες, οι οποίες πραγματοποιήθηκαν *in vitro* με τη χρήση των ειδών *Chlorella* και *Scenedesmus* επιβεβαίωσαν την αντιβακτηριδιακή δράση των τελευταίων. Επιπρόσθετα, ορισμένα καροτενοειδή έχουν ίδια δράση με την προβιταμίνη Α και μπορούν να μετατραπούν σε βιταμίνη Α. Όμως στην περίπτωση που είναι επιθυμητή η προσθήκη προϊόντων των μικροφυκών σε φάρμακα, τα όρια μέσα στα οποία γίνεται η επεξεργασία των μικροφυκών καθίστανται πολύ περιορισμένα και αυστηρά. [8] [29] [30]

Σταθερά Βιοχημικά Ισότοπα

Τα μικροφύκη αποτελούν ιδανική πηγή σταθερών βιοχημικών ισοτόπων, λόγω της φωτοσυνθετικής ικανότητας τους με την οποία μπορούν να ενσωματώσουν σταθερά ισότοπα όπως ^{13}C , ^{15}N και ^2H από μόρια όπως $^{13}\text{CO}_2$, $^{15}\text{NO}_3$ και $^2\text{H}_2\text{O}$ σε μόρια υψηλότερης αξίας όπως αμινοξέα, υδατάνθρακες, λιπίδια και νουκλεϊκά οξέα ώστε να διευκολυνθεί η δόμηση τους σε ατομικό επίπεδο και να πραγματοποιηθεί σήμανση τους για εύκολη αναγνώριση τους σε μεταγενέστερα στάδια. Παρόλα αυτά, μελέτες που έγιναν με προσθήκη $^{13}\text{CO}_2$ στην καλλιέργεια των μικροφυκών για τη σήμανση πολυακόρεστων λιπαρών οξέων, έδειξαν ότι η απόδοση της διεργασίας σήμανσης είναι μικρή και η απώλεια ^{13}C μεγάλη.

Συμπεράσματα για τις Χρήσεις των Μικροφυκών σε Προϊόντα Υψηλής Αξίας

Με την παραγωγή των προϊόντων αυτών, αυξάνονται τα έσοδα, αλλά ταυτόχρονα και το κόστος της παραγωγής το οποίο ξεπερνά κατά πολύ εκείνο της παραγωγής βιοντίζελ από τη μονάδα. Η παραγωγή βιοντίζελ βασίζεται στο χαμηλό κόστος οπότε δεν συνδυάζεται εύκολα με την υψηλού κόστους παραγωγή των προϊόντων υψηλής προστιθέμενης αξίας, αφού σε αυτήν την περίπτωση αλλάζει ο προσανατολισμός της παραγωγής. Δηλαδή, στην περίπτωση που η μονάδα παράγει προϊόντα υψηλής προστιθέμενης αξίας, κρίνεται ασύμφορη η ταυτόχρονη παραγωγή βιοντίζελ, ενώ στην αντίστροφη περίπτωση αυξάνει σε πολύ μεγάλο βαθμό το κόστος παραγωγής της μονάδας. Επιπρόσθετα, εγείρει ανησυχίες η επεξεργασία των μικροφυκών με απόβλητα για τη μετέπειτα χρήση τους ως προϊόντα αυξημένης προστιθέμενης αξίας. Τέλος, η παραγωγή μικροφυκών και για άλλες χρήσεις, εκτός της παραγωγής βιοντίζελ, αποτελεί μία επιλογή που δύναται να κάνει βιώσιμη τη λειτουργία της μονάδας, αλλά μόνο στην περίπτωση της διάθεσης των προϊόντων αυτών στην αγορά σε υψηλές τιμές και με σχετικά υψηλή απορρόφηση των τελευταίων από αυτή, κάτι το οποίο απαιτεί έρευνα της ζήτησης των προϊόντων αυτών στην αγορά. [8]

viii. Σύγκριση των Ειδών Μικροφυκών

Τα χαρακτηριστικά της μονάδας, η οποία προορίζεται για την καλλιέργεια των μικροφυκών, αποτελούν ένα σημαντικό δείκτη για την οικονομική βιωσιμότητα της συνολικής διεργασίας παραγωγής βιοντίζελ από μικροφύκη. Τα κριτήρια τα οποία λαμβάνονται υπόψη κατά τη διαδικασία επιλογής τοποθεσίας της μονάδας είναι τα εξής: (1) η προσφορά και οι απαιτήσεις (ζήτηση) σε νερό, καθώς και τα ποιοτικά και ποσοτικά χαρακτηριστικά του, όπως η αλατότητα και η χημεία του, (2) η τοπολογία, η γεωλογία και η ιδιοκτησία της εδαφικής έκτασης, η οποία προορίζεται για την τοποθέτηση, ίδρυση και εγκατάσταση της μονάδας παραγωγής, (3) οι κλιματικές συνθήκες, η θερμοκρασία, η μόνωση, η ηλιοφάνεια και η πιθανότητα βροχής στη συγκεκριμένη τοποθεσία και (4) η ευκολία παροχής θρεπτικών συστατικών και πηγών άνθρακα στη μονάδα.

Ακόμη, χρειάζεται προσδιορισμός του τρόπου λειτουργίας της μονάδας, καθώς και του τύπου αυτής. Πιο συγκεκριμένα, απαιτείται να επιλεγεί αν η μονάδα καλλιέργειας των μικροφυκών θα λειτουργεί συνεχώς (συνεχής λειτουργία) ή σε παρτίδες (batch) και, επιπρόσθετα, αν το σύστημα θα είναι ανοικτό (ανοικτές λίμνες, raceways) ή κλειστό (φωτοβιοαντιδραστήρας - PBR). Τα προηγούμενα βρίσκονται σε άμεση εξάρτηση με το είδος του μικροφύκου το οποίο επιλέγεται για καλλιέργεια, τις περιβαλλοντικές συνθήκες, οι οποίες επικρατούν στην περιοχή, τη διαθεσιμότητα των θρεπτικών συστατικών στην καλλιέργεια καθώς και τη δυνατότητα συνδυασμού της παραγωγής βιοντίζελ με τον

ταυτόχρονο έλεγχο της ρύπανσης του περιβάλλοντος από βιομηχανίες, οι οποίες βρίσκονται σε σχετικά μικρή απόσταση από την καλλιέργεια και παράγουν CO₂, το οποίο δεσμεύεται για χρήση από την τελευταία. Ακόμη, η καλλιέργεια μπορεί να χρησιμοποιήσει άζωτο και φώσφορο για την ανάπτυξη της, δεσμεύοντας τα μετά την απομάκρυνση τους από τα αστικά λύματα.

Εκτός του εξοπλισμού που απαιτείται για την ανάπτυξη της καλλιέργειας των μικροφυκών, σημαντικούς παράγοντες αποτελούν η επιλογή του είδους του μικροφύκου το οποίο θα χρησιμοποιηθεί, η επιλογή των συνθηκών υπό τις οποίες αυτό αναπτύσσεται και τα θρεπτικά συστατικά που απαιτούνται για την ανάπτυξη του. Στις περισσότερες περιπτώσεις, η παραγωγή του βιοντίζελ πραγματοποιείται με την επιλογή ειδών μικροφυκών, τα οποία έχουν δείξει ικανοποιητικά αποτελέσματα ως προς είτε το λιπιδιακό περιεχόμενο τους είτε την παραγωγικότητα τους σε βιοντίζελ. Η επιλογή αυτή βασίζεται σε πληροφορίες από πηγές της διεθνούς βιβλιογραφίας, τα αποτελέσματα των οποίων συνοψίζονται σε συγκεντρωτικούς πίνακες όπως ο πίνακας 1. Παρόλα αυτά, πολλές φορές δεν αρκεί αποκλειστικά αυτή η μελέτη για να εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα, οπότε πραγματοποιείται μία πιο ενδελεχής έρευνα στα είδη των μικροφυκών, τα χαρακτηριστικά τους, τη λειτουργία τους και τις παραγωγικές τους δυνατότητες. Γενικά, πληροφορίες για θέματα, τα οποία σχετίζονται με τα μικροφύκη, μπορούν να συλλεχθούν από διάφορες πηγές, διεθνώς, με τις σημαντικότερες να αποτελούν τμήματα πανεπιστημίων, τα οποία κατέχουν τις δικές τους συλλογές, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, εθνικοί και διεθνείς οργανισμοί σχετικοί με θέματα περιβάλλοντος και ειδικότερα μικροφυκών και τέλος απευθείας από τη μελέτη των αποτελεσμάτων των πειραματικών μετρήσεων σε δείγματα διαφορετικών πηγών, στη στεριά και τη θάλασσα με στόχο την εξαγωγή συμπερασμάτων για την καταλληλότητα διαφόρων ειδών μικροφυκών για την παραγωγή βιοντίζελ, ή την αξιοποίηση τους σε άλλες εφαρμογές.

Τα μικροφύκη μίας καλλιέργειας καλούνται να επιβιώσουν και να αναπτυχθούν σε μία πληθώρα διαφορετικών συνθηκών, οι οποίες, τις περισσότερες φορές, δεν είναι ευνοϊκές για αυτά. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν οι δυσμενείς περιβαλλοντικές συνθήκες (ηλιοφάνεια, θερμοκρασία, pH) και η μερική έλλειψη (πενία) σε θρεπτικά συστατικά. Για αυτόν τον λόγο, πολλές φορές προτείνεται η χρήση μικροφυκών τα οποία προέρχονται από θερμές πηγές ή από βιομηχανικά λύματα, τα οποία μπορούν και επιβιώνουν στις ζητούμενες συνθήκες.

Μία πολυκριτηριακή ανάλυση των παραγόντων που επηρεάζουν την επιλογή του κατάλληλου είδους μικροφύκου για μία εφαρμογή, ή ένα σύνολο εφαρμογών, όπως η παραγωγή βιοντίζελ που μελετάται στη συγκεκριμένη περίπτωση, περιλαμβάνει:

- i. τον ρυθμό ανάπτυξης
- ii. το λιπιδιακό περιεχόμενο
- iii. την αντοχή σε αλλαγές των συνθηκών του περιβάλλοντος
- iv. τη διαθεσιμότητα θρεπτικών συστατικών
- v. την ευκολία επεξεργασίας και συλλογής της βιόμαζας
- vi. την πιθανότητα ανάκτησης πολύτιμων ουσιών, χημικών, βιοχημικών ή βιολογικών.

Τα παραπάνω κριτήρια λαμβάνουν ταυτόχρονα υπόψη τα μικροφύκη και τον τρόπο με τον οποίο αυτά καλλιεργούνται. Τα είδη που εξετάζονται στη βιβλιογραφία ή λαμβάνονται από το περιβάλλον δεν είναι κατάλληλα για καλλιέργεια υπό ιδιαίτερα δυσμενείς συνθήκες. Οπότε, η γενετική μηχανική αποτελεί μία επιλογή που θα μπορούσε να ακολουθηθεί. Με αυτόν τον τρόπο γίνεται δυνατή η μορφοποίηση των χαρακτηριστικών των μικροφυκών με γνώμονα τις απαιτήσεις της διεργασίας και τα επιθυμητά τελικά προϊόντα. Ακόμη, βελτιώνονται η παραγωγικότητα και η τελική παραγωγή και σύσταση των

λιπιδίων. Παρόλα αυτά, η πιθανότητα βιολογικής μόλυνσης, αυστηρής και ταυτόχρονα περιοριστικής νομοθεσίας καθώς και ήδη υπαρχουσών βιώσιμων λύσεων αναστέλλουν την ευρεία χρήση γενετικά τροποποιημένων οργανισμών.

Παρότι απαιτεί χρόνο και κόστος, η επιλογή του μικροοργανισμού εκείνου που ταιριάζει καλύτερα στις συνθήκες λειτουργίας της διεργασίας παρουσιάζει αρκετά πλεονεκτήματα. Πρώτον, απαλλάσσει την εταιρία παραγωγής βιοντίζελ από μικροφύκη από προμηθευτές και αποκτά εμπειρία επί του θέματος, η οποία μπορεί να αποφέρει διάφορα πλεονεκτήματα στο μέλλον. Δεύτερον, η εύρεση νέου είδους μικροφυκών ή η ανάπτυξη νέων στελεχών αντιπροσωπεύει μια επιχειρηματική ευκαιρία και μπορεί να αποτελέσει πηγή εσόδων. Επομένως, η επιλογή του μικροφύκου είναι πολύ σημαντική για την αποτίμηση της βιωσιμότητας μίας ανάλογης επιχειρηματικής κίνησης.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται ένας συγκεντρωτικός και ταυτόχρονα συγκριτικός πίνακας με τα πιο δημοφιλή, στις βιοτεχνολογικές εφαρμογές, είδη μικροφυκών, το λιπιδιακό τους περιεχόμενο και τις παραγωγικότητές τους.

Λιπιδιακό Περιεχόμενο και Παραγωγικότητες Διαφόρων Ειδών Μικροφυκών

Είδος	Λιπιδιακό Περιεχόμενο (% κ.β. ξηρής βιομάζας)	Παραγωγικότητα Λιπιδίων (mg/L/ημέρα)	Ογκομετρική Παραγωγικότητα Βιομάζας (g/L/ημέρα)	Εδαφική Παραγωγικότητα Βιομάζας (g/m ² /ημέρα)
<i>Ankistrodesmus sp.</i>	24,0-31,0	-	-	11,5-17,4
<i>Botryococcus braunii</i>	25,0-75,0	-	0,02	3,0
<i>Chaetoceros muelleri</i>	33,6 14,6-	21,8	0,07	-
<i>Chaetoceros calcitrans</i>	16,4/39,8	17,6	0,04	-
<i>Chlorella emersonii</i>	25,0-63,0	10,3-50,0	0,036-0,041	0,91-0,97
<i>Chlorella protothecoides</i>	14,6-57,8	1214	2,00-7,70	-
<i>Chlorella sorokiniana</i>	19,0-22,0	44,7	0,23-1,47	-
<i>Chlorella vulgaris</i>	5,0-58,0	11,2-40,0	0,02-0,20	0,57-0,95
<i>Chlorella sp.</i>	10,0-48,0	42,1	0,02-2,5	1,61-16,47/25
<i>Chlorella pyrenoidosa</i>	2,0	-	2,90-3,64	72,5/130
<i>Chlorella</i>	18,0-57,0	18,7	-	3,50-13,90
<i>Chlorococcum sp.</i>	19,3	53,7	0,28	-
<i>Cryptocodinium cohnii</i>	20,0-51,1	-	10,00	-
<i>Dunaliella salina</i>	6,0-25,0	116	0,22-0,34	1,6-3,5/20-38
<i>Dunaliella primolecta</i>	23,1	-	0,09	14,0
<i>Dunaliella tertiolecta</i>	16,7-71,0	-	0,12	-
<i>Dunaliella sp.</i>	17,5-67,0	33,5	-	-
<i>Ellipsoidion sp.</i>	27,4	47,3	0,17	-
<i>Euglena gracilis</i>	14,0-20,0	-	7,70	-
<i>Haematococcus pluvialis</i>	25,0	-	0,05-0,06	10,2-36,4
<i>Isochrysis galbana</i>	7,0-40,0	-	0,32-1,60	-
<i>Isochrysis sp.</i>	7,1-33,0	37,8	0,08-0,17	-
<i>Monodus subterraneus</i>	16,0	30,4	0,19	-
<i>Monallanthus salina</i>	20,0-22,0	-	0,08	12,0
<i>Nannochloris sp.</i>	20,0-56,0	60,9-76,5	0,17-0,51	-
<i>Nannochloropsis oculata</i>	22,7-29,7	84,0-142,0	0,37-0,48	-

<i>Nannochloropsis sp.</i>	12,0-53,0	37,6-90,0	0,17-1,43	1,9-5,3
<i>Neochloris oleoabundans</i>	29,0-65,0	90,0-134,0	-	-
<i>Nitzschia sp.</i>	16,0-47,0	-	-	8,8-21,6
<i>Oocystis pusilla</i>	10,5	-	-	40,6-45,8
<i>Pavlova salina</i>	30,9	49,4	0,16	-
<i>Pavlova lutheri</i>	35,5	40,2	0,14	-
<i>Phaeodactylum tricornutum</i>	18,0-57,0 9,0-	44,8	0,003-1,9	2,4-21
<i>Porphyridium cruentum</i>	18,8/60,7	34,8	0,36-1,50	25,0
<i>Scenedesmus obliquus</i>	11,0-55,0	-	0,004-0,74	-
<i>Scenedesmus quadricauda</i>	1,9-18,4	35,1	0,19	-
<i>Scenedesmus sp.</i>	19,6-21,1	40,8-53,9	0,03-0,26	2,43-13,52
<i>Skeletonema sp.</i>	13,3-31,8	27,3	0,09	-
<i>Skeletonema costatum</i>	13,5-51,3	17,4	0,08	-
<i>Spirulina platensis</i>	4,0-16,6	-	0,06-4,3	1,5-14,5/24-51
<i>Spirulina maxima</i>	4,0-9,0	-	0,21-0,25	25,0
<i>Thalassiosira pseudonana</i>	20,6	17,4	0,08	-
<i>Tetraselmis suecica</i>	8,5-23,0	27,0-36,4	0,12-0,32	19,0
<i>Tetraselmis sp.</i>	12,6-14,7	43,4	0,30	-

Πίνακας III.1.6 [2] [31]

ix. *Chlorella sp.*

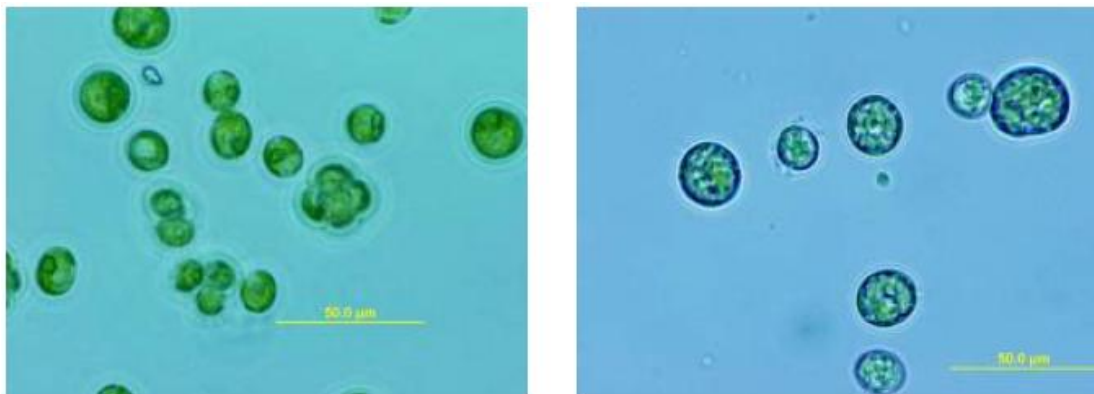


Figure 14 - *Chlorella emersonii*, left picture control culture, right picture N-starved culture

D. Reinecke, BGU

Δομικά & Μορφολογικά Χαρακτηριστικά

Το γένος *Chlorella* αποτελείται από πολλά στελέχη και έχει σημαντικό ρόλο σε πολλές βιοτεχνολογικές εφαρμογές. Η *Chlorella* ανήκει στην γενικότερη κατηγορία των μονοκυττάρων ευκαρυωτικών οργανισμών. Ειδικότερα αποτελεί ένα πράσινο φύκος της οικογένειας Chlorophyta. Το σχήμα των κυττάρων είναι είτε κυκλικό είτε ελλειψοειδές, δεν έχει μαστίγια, ενώ το μέγεθος τους είναι 2-10 μm. Το κυτταρικό τοίχωμα περιέχει γλυκοζαμίνη (χιτοσίνη). Ο πυρήνας είναι μονός και βρίσκεται στο κέντρο του κυττάρου, ενώ μονός είναι και ο χλωροπλάστης και το πυρηνοειδές. Ο μόνος γνωστός τρόπος αναπαραγωγής είναι εκείνος του διπλασιασμού κατά τον οποίο παράγονται από 2 έως 16 κύτταρα από έναν μητρικό. Το είδος *Chlorella* βρίσκεται τόσο σε γλυκά όσο και σε αλμυρά νερά. Ακόμη, η *Chlorella* αποτελείται από περισσότερα από 100 στελέχη εκ των οποίων τα πιο δημοφιλή στις βιοτεχνολογικές εφαρμογές είναι τα: *C. vulgaris*, *C. lobophora*, *C. sorokiniana*. [32]

Ορισμένα είδη παρουσιάζουν αυξημένες αντοχές ακόμη και σε θερμοκρασίες που ξεπερνούν τους 40 °C και αυξημένους ρυθμούς παραγωγής ($\mu_{max} = 0.20 \text{ h}^{-1}$). Ακόμη, η αντοχή σε διάτμηση, η αντίσταση στην προσκόλληση στα τοιχώματα του αντιδραστήρα καθώς και η χαμηλή τάση δημιουργίας συσσωματωμάτων αποτελούν πλεονεκτήματα της μορφολογίας των μικροφυκών κατά τη χρήση τους σε βιοτεχνολογικές εφαρμογές. Επίσης, το είδος *Chlorella* αναπτύσσεται με CO₂ που μπορεί να φτάνει έως και 40% κατ' όγκο περιεκτικότητα στο μίγμα τροφοδοσίας. [32]

Ειδικότερα, το στέλεχος *Chlorella vulgaris* παρουσιάζει πολύ μεγαλύτερη απόδοση κατά τη φωτοσύνθεση από τους φυτικούς οργανισμούς του εδάφους και παραγωγικότητες έως και 10 φορές υψηλότερες σε σύγκριση με αυτούς. Ακόμη, η αξιοποίηση των ανόργανων θρεπτικών συστατικών είναι πλήρης και η χρήση του νερού χαμηλότερη. [32]

Τέλος, στους πίνακες Π.3 και Π.4 του παραρτήματος φαίνονται η στοιχειακή ανάλυση του είδους *Chlorella* καθώς και το περιεχόμενο της *Chlorella* σε βιταμίνες. [32]

2. Περιπτώσεις Καλλιέργειών Μικροφυκών

i. Φάσεις της Κυτταρικής Ανάπτυξης

Η γνώση της διαδικασίας της κυτταρικής ανάπτυξης των μικροφυκών είναι απαραίτητη για την κατανόηση της λειτουργίας των μικροοργανισμών αυτών κατά τη διάρκεια της καλλιέργειας τους. Η κυτταρική ανάπτυξη των μικροφυκών περιλαμβάνει πέντε φάσεις. Αυτές είναι: (1) η λανθάνουσα φάση ή φάση επώασης, (2) η εκθετική φάση, (3) η φάση του φθίνοντα ρυθμού ανάπτυξης, (4) η στατική φάση και (5) η φάση θανάτου. [33]

Κατά τη λανθάνουσα φάση πραγματοποιείται πολύ μικρή αύξηση της πυκνότητας της καλλιέργειας των μικροφυκών. Η διάρκεια της φάσης είναι μεγάλη στην περίπτωση που τα μικροφύκη μεταφέρονται από ένα πιάτο στη υγρή καλλιέργεια. Καλλιέργειες οι οποίες εμβολιάζονται με εκθετικά αναπτυσσόμενα μικροφύκη έχουν μικρές λανθάνουσες φάσεις, γεγονός που οδηγεί σε σημαντική μείωση του απαιτούμενου χρόνου για το πέρασμα στη βιομηχανική κλίμακα (upscaling). Η λανθάνουσα φάση χαρακτηρίζεται από την φυσιολογική προσαρμογή του κυτταρικού μεταβολισμού στην ανάπτυξη, όπως η αύξηση των ενζύμων και των μεταβολιτών εμπλέκεται στην ανάπτυξη (μέσω διαχωρισμού) των κυττάρων και την δέσμευση του άνθρακα. [33]

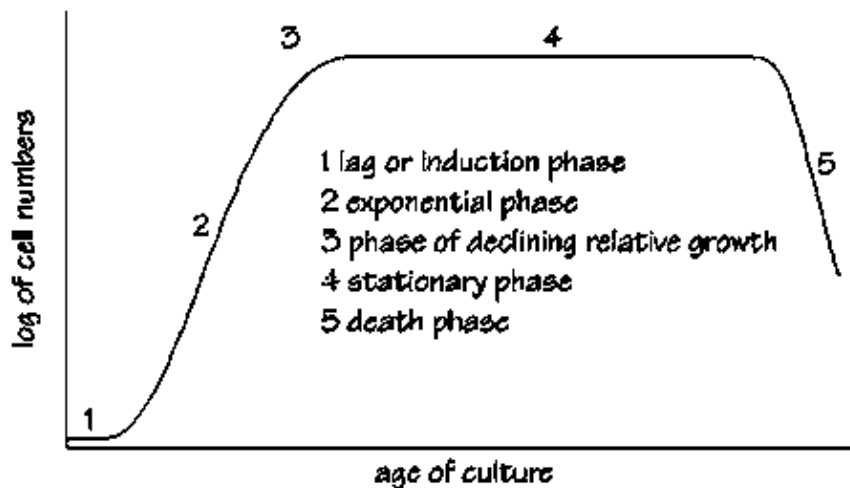
Στην εκθετική φάση, η πυκνότητα των κυττάρων αυξάνεται εκθετικά συναρτήσει του χρόνου βάσει της εξίσωσης, $C_t = C_0 \cdot e^{mt}$, όπου C_t και C_0 είναι οι συγκεντρώσεις των κυττάρων τις χρονικές στιγμές t και 0 αντίστοιχα, ενώ m είναι ο ειδικός ρυθμός ανάπτυξης, ο οποίος εξαρτάται από το είδος των μικροφυκών, την ένταση της φωτεινής ακτινοβολίας και την θερμοκρασία. [33]

Κατά τη φάση του φθίνοντα ρυθμού ανάπτυξης, ο ρυθμός της κυτταρικής ανάπτυξης (μέσω διαχωρισμού των κυττάρων) μειώνεται. Οι παράγοντες που συντελούν σε αυτή τη μείωση είναι τα θρεπτικά συστατικά, το φως, το pH, το CO₂ καθώς και άλλοι φυσικοί και χημικοί παράγοντες. [33]

Στη στατική φάση επικρατεί ισορροπία του ρυθμού ανάπτυξης και της δράσης των περιοριστικών παραγόντων με αποτέλεσμα τη σταθερή πυκνότητα των κυττάρων. Πιο συγκεκριμένα, οι ρυθμοί ανάπτυξης και θανάτου των κυττάρων είναι ίσοι. [33]

Τέλος, κατά τη διάρκεια της φάσης του θανάτου, η ποιότητα του νερού υποβαθμίζεται και τα θρεπτικά συστατικά εξαντλούνται. Η πυκνότητα των κυττάρων μειώνεται και τελικά η καλλιέργεια καταρρέει. Άλλοι παράγοντες που οδηγούν στο ίδιο αποτέλεσμα είναι η έλλειψη οξυγόνου, η υπερθέρμανση, οι μεταβολές στο pH και η μόλυνση. Στόχος της καλλιέργειας των μικροφυκών είναι η παραμονή όλων, αν αυτό καθίσταται δυνατό, των κυττάρων στην εκθετική φάση. Επίσης, η θρεπτική αξία των παραγόμενων μικροφυκών είναι μειωμένη στην περίπτωση που αυτά βρεθούν μετά τη φάση του φθίνοντος ρυθμού ανάπτυξης. Η υποβάθμιση της θρεπτικής αξίας των τελικών προϊόντων οφείλεται στη μειωμένη ευεψία, την ελλιπή σύσταση και την πιθανή παραγωγή τοξικών μεταβολιτών. [33]

Στη συνέχεια φαίνεται ένα αντιπροσωπευτικό διάγραμμα των διαφόρων φάσεων της κυτταρικής ανάπτυξης (Σχήμα 1). [33]



Σχήμα III.2.1

ii. Είδη καλλιέργειών

Τα χαρακτηριστικά και η σύσταση των ανεπτυγμένων μικροφυκών εξαρτώνται σημαντικά από τις συνθήκες στις οποίες αναπτύσσεται η καλλιέργεια. Γενικά, υπάρχουν τέσσερις μεγάλες κατηγορίες τύπων συνθηκών για την καλλιέργεια μικροφυκών: η φωτοαυτότροφη, η ετερότροφη, η μικτότροφη και η φωτοετρότροφη καλλιέργεια. [34]

a. Φωτοαυτότροφη καλλιέργεια

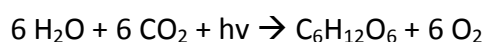
Η φωτοαυτότροφη καλλιέργεια, η οποία αποτελεί τον πιο συνηθισμένο τύπο συνθήκης για την ανάπτυξη των μικροφυκών, λαμβάνει χώρα στην περίπτωση που τα μικροφύκη χρησιμοποιούν φως, όπως για παράδειγμα το φως του ήλιου, ως πηγή ενέργειας και ανόργανα συστατικά, όπως το CO₂, ως πηγή άνθρακα ώστε να σχηματίσουν χημική ενέργεια μέσω της διεργασίας της φωτοσύνθεσης. Κατά την ανάπτυξη της φωτοαυτότροφης καλλιέργειας παρατηρείται μεγάλη διαφοροποίηση στο περιεχόμενο των μικροφυκών σε λιπίδια (lipid content) (5-68 %), το οποίο εξαρτάται από το είδος των μικροφυκών. Κανονικά, χρησιμοποιούνται συνθήκες περιορισμού του αζώτου ή του θρεπτικού υλικού ώστε να αυξηθεί το περιεχόμενο των μικροφυκών σε λιπίδια. Οπότε, η επίτευξη μεγάλου λιπιδιακού περιεχομένου των μικροφυκών έχει ως συνέπεια τον περιορισμό της παραγωγής βιομάζας. Επομένως, το περιεχόμενο σε λιπίδια δεν αποτελεί τον μοναδικό παράγοντα για την παραγωγική ικανότητα των μικροφυκών σε έλαια. Αυτό συμβαίνει διότι εκείνο πρέπει να λαμβάνεται υπόψη ταυτόχρονα με την τελική παραγωγή βιομάζας. Από τα προηγούμενα γίνεται αντιληπτό ότι η παραγωγικότητα των λιπιδίων (lipid productivity), η οποία συνδυάζει τα αποτελέσματα σε περιεχόμενο λιπιδίων με αυτά της παραγωγής βιομάζας, αποτελεί έναν αξιόπιστο δείκτη της παραγωγικότητας των μικροφυκών, λαμβάνοντας υπόψη την παραγωγή ελαίων. Η υψηλότερη καταγεγραμμένη παραγωγικότητα σε έλαια, βάσει βιβλιογραφικών δεδομένων, είναι 179 mg/L/d από το είδος *Chlorella* υπό φωτοαυτότροφη καλλιέργεια με 2% CO₂ και 0.25 vvm (Vessel Volume

per Minute) αερισμού. Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα της χρήσης φωτοαυτότροφης καλλιέργειας για την παραγωγή ελαίων από μικροφύκη αποτελεί η δέσμευση του CO₂, το οποίο χρησιμοποιείται ως πηγή άνθρακα για την ανάπτυξη των κυττάρων και την τελική παραγωγή των ελαίων. Ωστόσο, όταν το CO₂ είναι η μόνη πηγή άνθρακα, η καλλιέργεια πρέπει να είναι τοποθετημένη κοντά σε κάποια βιομηχανία η οποία παράγει σημαντικές ποσότητες CO₂ οι οποίες προηγουμένως κατέληγαν στην ατμόσφαιρα (π.χ. ΔΕΗ). Επιπλέον, σε σύγκριση με τις εναλλακτικές μεθόδους καλλιέργειας, περιορίζεται αισθητά το πρόβλημα της μόλυνσης με τη φωτοαυτότροφη καλλιέργεια. Γι' αυτόν τον λόγο, στα ανοικτά συστήματα, όπως λίμνες και πίστες ταχύτητες (raceways), προτιμάται η φωτοαυτότροφη καλλιέργεια για την ανάπτυξη των μικροφυκών και την παραγωγή ελαίων.

Τέλος, το είδος *Chlorella* διπλασιάζεται σε λιγότερο από 3 ώρες, γρηγορότερα από τους περισσότερους φωτοαυτότροφους οργανισμούς. [34]

Φωτοσύνθεση

Η φωτοσύνθεση είναι μία διαδικασία την οποία ακολουθούν οι φωτοαυτότροφοι οργανισμοί για να μετατρέψουν τα ανόργανα συστατικά και την φωτεινή (ηλιακή) ενέργεια σε οργανική ύλη, η οποία αποτελεί την τροφή, η οποία είναι απαραίτητη για την επιβίωση τους. Η αντίδραση της φωτοσύνθεσης παρατίθεται στη συνέχεια. [35]



Η φωτοσύνθεση μπορεί να διαχωριστεί σε δύο στάδια: το σκοτεινό και το φωτεινό στάδιο. Στο φωτεινό στάδιο, η φωτεινή ενέργεια απορροφάται από χρωστικές των κεραιών του φωτοσυστήματος και μετατρέπεται σε NADPH₂ και ATP. Στο σκοτεινό στάδιο, τα προϊόντα του φωτεινού σταδίου καταναλώνονται προς παραγωγή υδατανθράκων από το CO₂. Στα μικροφύκη, όπως και στους περισσότερους φυτικούς οργανισμούς, τα στάδια αυτά δρουν ανεξάρτητα. Πιο συγκεκριμένα, το φωτεινό στάδιο ενεργοποιείται αυτόματα όταν υπάρχει διαθέσιμη φωτεινή ενέργεια και απενεργοποιείται σε αντίθετη περίπτωση, οπότε ενεργοποιείται το σκοτεινό στάδιο. [35]

b. Ετερότροφη καλλιέργεια

Ορισμένα είδη μικροφυκών δύνανται να αναπτυχθούν όχι μόνο σε συνθήκες αυτότροφης καλλιέργειας αλλά και χρησιμοποιώντας οργανικό άνθρακα υπό συνθήκες έλλειψης φωτός, όπως αναπτύσσονται τα βακτήρια. Αυτή η περίπτωση καλλιέργειας, όπου τα μικροφύκη χρησιμοποιούν οργανικό άνθρακα ταυτόχρονα ως πηγή ενέργειας και ως θρεπτικό συστατικό, καλείται ετερότροφη καλλιέργεια. Σε αυτό το είδος καλλιέργειας αποφεύγονται προβλήματα τα οποία σχετίζονται με τον περιορισμένο φωτισμό, ο οποίος εμποδίζεται από την υψηλή πυκνότητα κυττάρων στους φωτοβιοαντιδραστήρες κλειστού τύπου. Στις ετερότροφες καλλιέργειες παρουσιάζονται υψηλά επίπεδα παραγωγής και παραγωγικότητας βιομάζας, συγκριτικά με τις αυτότροφες. Ορισμένα είδη μικροφυκών παρουσιάζουν μεγαλύτερο περιεχόμενο σε λιπίδια κατά την ανάπτυξη τους υπό συνθήκες ετερότροφης καλλιέργειας. Για παράδειγμα, το είδος *Chlorella* παρουσίασε 40% αύξηση περιεχομένου σε λιπίδια κατά τη μετατροπή της καλλιέργειας από αυτότροφη σε

ετερότροφη. Τα μικροφύκη μπορούν να αφομοιώσουν οργανικό άνθρακα από μία πληθώρα πηγών, όπως γλυκόζη, γλυκερόλη, φρουκτόζη, σακχαρόζη, λακτόζη, γαλακτόζη, μαννόζη ή κάποιο οξικό άλας (acetate), για την ανάπτυξη τους. Επιπρόσθετα, υπάρχουν εναλλακτικές πηγές οργανικού άνθρακα, μειωμένου κόστους, όπως η CPH (υδρολυσάτη σκόνης καλαμποκιού - corn powder hydrolysate) με τη χρήση της οποίας επιτυγχάνονται υψηλές τιμές παραγωγικότητας βιόμαζας (2 g/L/d) και λιπιδίων (932 mg/L/d). Η χρήση συνθηκών ετερότροφης καλλιέργειας για την ανάπτυξη των μικροφυκών οδηγεί σε σχεδόν 20 φορές μεγαλύτερη παραγωγικότητα σε λιπίδια σε σύγκριση με τις αυτότροφες συνθήκες. Όμως, κύρια μειονεκτήματα της αυτού του τύπου καλλιέργειας αποτελούν τα συχνά προβλήματα μόλυνσης σε ετερότροφα συστήματα, τα οποία χρησιμοποιούν σάκχαρα ως πηγή του άνθρακα που χρειάζονται για την ανάπτυξη τους (sugar-based). [34]

c. Μικτότροφη καλλιέργεια

Η μικτοτροφική καλλιέργεια λαμβάνει χώρα όταν τα μικροφύκη ακολουθούν τη διαδικασία της φωτοσύνθεσης και χρησιμοποιούν ταυτόχρονα οργανικές ενώσεις και ανόργανο άνθρακα (CO₂) ως πηγές άνθρακα για την ανάπτυξη τους. Αυτό σημαίνει ότι τα μικροφύκη έχουν δυνατότητα να αναπτυχθούν είτε υπό αυτότροφες είτε υπό ετερότροφες συνθήκες ή και υπό τις δύο συνθήκες. Τα μικροφύκη χρησιμοποιούν οργανικές ενώσεις και ανόργανο άνθρακα (CO₂) ως πηγές άνθρακα και επαναχρησιμοποιούν το CO₂ το οποίο απελευθερώνεται από τα ίδια κατά την κυτταρική αναπνοή με χρήση αυτότροφων συνθηκών. Παρόλα αυτά, οι συνθήκες μικτότροφης καλλιέργειας χρησιμοποιούνται σπάνια, σε σχέση με τις δύο προηγούμενες, κατά την παραγωγή ελαίων από μικροφύκη, οπότε δεν υπάρχουν αρκετά βιβλιογραφικά δεδομένα για αυτήν την περίπτωση. [34]

d. Φωτοετερότροφη καλλιέργεια

Η φωτοετερότροφη καλλιέργεια αφορά σε συστήματα τα οποία απαιτούν φωτισμό ως πηγή ενέργειας και χρησιμοποιούν οργανικές ενώσεις ως πηγή άνθρακα. Η κύρια διαφορά της φωτοετερότροφης καλλιέργειας με τη μικτότροφη καλλιέργεια είναι ότι η πρώτη χρησιμοποιεί φωτισμό ως πηγή ενέργειας, ενώ η τελευταία χρησιμοποιεί οργανικές ενώσεις για τον ίδιο σκοπό. Επομένως, η φωτοετερότροφη καλλιέργεια χρειάζεται ταυτόχρονα σάκχαρα και φωτισμό για την ανάπτυξη της. Παρότι, η παραγωγή ορισμένων χρήσιμων φωτορυθμιζόμενων (light-regulated) μεταβολιτών βελτιώνεται σε συνθήκες φωτοετερότροφης καλλιέργειας, η χρήση των συνθηκών αυτών για την παραγωγή βιοντίζελ είναι πολύ σπάνια, όπως και στην περίπτωση της μικτότροφης καλλιέργειας. [34]

e. Σύγκριση των Διαφόρων Ειδών Καλλιέργειας

Παρότι, η παραγωγή ελαίων από μικροφύκη εξαρτάται σημαντικά από το είδος αυτών, βιβλιογραφικά δεδομένα δείχνουν ότι η ανάπτυξη μικροφυκών υπό συνθήκες ετερότροφης καλλιέργειας έχουν ως αποτέλεσμα την αυξημένη παραγωγή ελαίων σε σύγκριση με τους υπόλοιπους τύπους συνθηκών. Όμως, ένα μειονέκτημα της ετερότροφης καλλιέργειας αποτελεί η ευκολία με την οποία η πρώτη μπορεί να μολυνθεί, ειδικότερα στην περίπτωση της ανάπτυξης σε ανοικτά συστήματα, δημιουργώντας προβλήματα στην παραγωγή. Ακόμη, το κόστος χρήσης οργανικών ενώσεων ως πηγή άνθρακα, αυξάνει σημαντικά το συνολικό κόστος παραγωγής. [34]

Ο πλέον συνήθης τύπος συνθηκών καλλιέργειας για την παραγωγή ελαίων από μικροφύκη είναι η φωτοαυτότροφη καλλιέργεια, διότι η τελευταία είναι εύκολο να μεταφερθεί σε μεγάλη κλίμακα, όπως στην περίπτωση των ανοικτών λιμνών και ταυτόχρονα παρέχει μία υπηρεσία, η οποία αποτελεί λύση για τις βιομηχανίες που εκπέμπουν CO₂ στην ατμόσφαιρα, επειδή το τελευταίο δεσμεύεται για να χρησιμοποιηθεί ως πηγή άνθρακα της καλλιέργειας, και τελικά να μετατραπεί σε έλαια. Όμως, η παραγωγή ελαίων στην περίπτωση αυτή είναι αρκετά χαμηλότερη συγκριτικά με αυτή της ετερότροφης καλλιέργειας, επειδή στη φωτοαυτότροφη καλλιέργεια παρατηρείται αργή ανάπτυξη κυττάρων και μικρή παραγωγικότητα σε βιόμαζα. Παρόλα αυτά, το χαμηλό κόστος μεταφοράς στη μεγάλη κλίμακα κάνει τη μέθοδο ανταγωνιστική. [34]

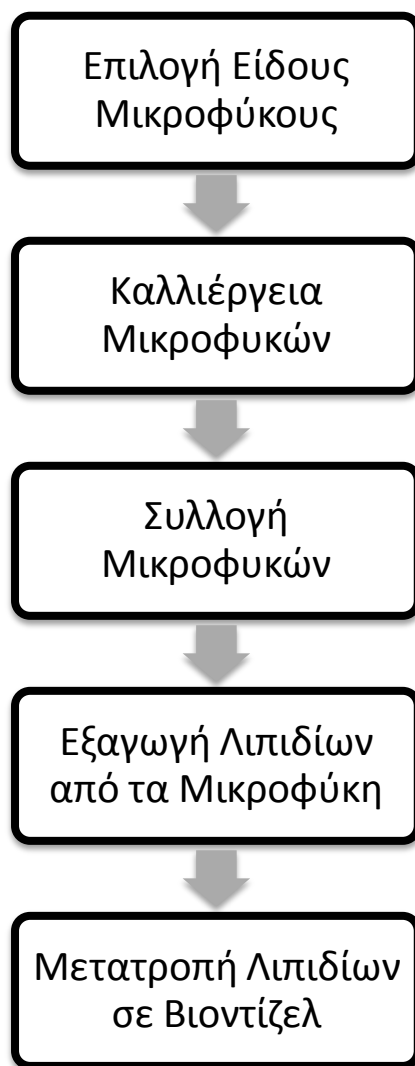
Μέχρι στιγμής, δεν υπάρχουν αρκετά βιβλιογραφικά δεδομένα σχετικά με την παραγωγή ελαίων από μικροφύκη υπό συνθήκες μικτότροφης ή φωτοετερότροφης καλλιέργειας. Γενικότερα, μειονέκτημα των μεθόδων αποτελεί ο κίνδυνος μόλυνσης και οι απαιτήσεις φωτισμού των καλλιεργειών αυτών, τα οποία οδηγούν στο συμπέρασμα ότι πιθανώς χρειάζεται η κατασκευή ειδικού εξοπλισμού κατά τη μεταφορά τους στη μεγάλη κλίμακα, γεγονός το οποίο αυξάνει το κόστος παραγωγής. [34]

3. Διάγραμμα Ροής Διεργασίας

i. Εισαγωγή

Η συνολική διεργασία παραγωγής αποτελείται από επιμέρους διαδικασίες οι οποίες εξετάζονται ανεξάρτητα αρχικά μεταξύ τους κι έπειτα ως σύνολο για την αποτίμηση του συστήματος παραγωγής τόσο από οικονομικής σκοπιάς όσο και τεχνικά. Ακολούθως παρατίθενται διαγράμματα ροής της διεργασίας παραγωγής βιοντίζελ από μικροφύκη, τα οποία βοηθούν στην κατανόηση της λειτουργίας του συστήματος, αλλά ταυτόχρονα εμφανίζουν τα σημεία όπου υπάρχει πιθανότητα, ή δυνατότητα, βελτίωσης του.

ii. Τυπικό Διάγραμμα Ροής



Σχήμα III.3.1

Το παραπάνω διάγραμμα αποτελεί μία πρώτη εικόνα για τη διαδικασία παραγωγής βιοντίζελ από μικροφύκη. Στο διάγραμμα αυτό διακρίνονται οι βασικές διεργασίες οι οποίες εκτελούνται με στόχο την παραγωγή του τελικού προϊόντος (βιοντίζελ). Αυτές αποτελούνται από τέσσερις διεργασίες βιομηχανικής κλίμακας (Καλλιέργεια και συλλογή μικροφυκών, εξαγωγή λιπιδίων από τα μικροφύκη, μετατροπή λιπιδίων σε βιοντίζελ) και από μία απόφαση, την επιλογή του μικροφύκου, η οποία προκύπτει έπειτα από ενδεδειγμένη βιβλιογραφική έρευνα της βιολογίας των φυτικών αυτών μικροοργανισμών.

Μολονότι, αρχικά η διεργασία παραγωγής στο σύνολο της φαίνεται απλή και εύκολη, αυτή καθίσταται ιδιαίτερα περίπλοκη λόγω της πληθώρας των διαθέσιμων τεχνικών από τις οποίες πρέπει να επιλεγθούν οι καταλληλότερες, ανάλογα με τα εγγενή χαρακτηριστικά του συστήματος και τον σκοπό της καλλιέργειας μικροφυκών. Οι επιλογές για κάθε στάδιο φαίνονται στο διάγραμμα που ακολουθεί, το οποίο αποτελεί μία πιο αναλυτική θεώρηση των διαφόρων σταδίων κατά την καλλιέργεια των μικροφυκών για την παραγωγή βιοντίζελ.

Η σύγκριση των δύο διαγραμμάτων, τα οποία αρχικά φαίνονται αρκετά διαφορετικά μεταξύ τους, δείχνει την εξέλιξη της αρχικής μελέτης για την παραγωγή βιοντίζελ σε βιομηχανική κλίμακα. Αυτό συμβαίνει διότι σε εργαστηριακή κλίμακα οι επιλογές είναι αρκετά περιορισμένες, οι συνθήκες σταθερές, ενώ το κόστος και ο ρυθμός παραγωγής (σε ετήσια βάση) δεν αποτελούν προβλήματα προς βελτιστοποίηση βάσει των διαθέσιμων τεχνικών μέσων. Όμως, σε βιομηχανική κλίμακα, αυτά τα προβλήματα δημιουργούν νέες οδούς που μπορούν να ακολουθηθούν ώστε να εξασφαλιστεί η βιωσιμότητα της μονάδα παραγωγής, από τεχνικής και, ταυτόχρονα, οικονομικής άποψης.

Πιο συγκεκριμένα, το αναλυτικό διάγραμμα αποτελείται από οκτώ στάδια, σε αντίθεση με το τυπικό διάγραμμα που αποτελείται από πέντε (4 διεργασίες + 1 απόφαση). Η απόφαση αυτή ενσωματώνεται στο πρώτο στάδιο του αναλυτικού διαγράμματος μαζί με τις υπόλοιπες αρχικές ροές και τα υλικά που απαιτούνται από την παραγωγική διαδικασία. Το στάδιο που ακολουθεί περιλαμβάνει τα διαφορετικά είδη καλλιέργειας των μικροφυκών (αυτότροφη, ετερότροφη, συνδυασμός των δύο). Έπειτα, ο αντιδραστήρας στον οποίο αναπτύσσονται τα μικροφύκη μπορεί να είναι είτε μία ανοικτή λίμνη είτε ένας φωτοβιοαντιδραστήρας. Οι φωτοβιοαντιδραστήρες είναι τριών ειδών: δακτυλιοειδείς, σωληνοειδείς, επίπεδων πάνελ. Επίσης, σε μερικές περιπτώσεις προτιμάται ο συνδυασμός ανοικτής λίμνης και φωτοβιοαντιδραστήρων για μείωση κόστους και σχετική αύξηση παραγωγικότητας με συνύπαρξη των δύο ειδών. Στην τελευταία περίπτωση, η συνύπαρξη αμφότερων στην παραγωγική διαδικασία περιπλέκει αρκετά το σύστημα, οπότε και τη ρύθμιση του προς βελτιστοποίηση της παραγωγής.

Στη συνέχεια, επιλέγεται μέθοδος συλλογής των μικροφυκών από την καλλιέργεια, κομμάτι το οποίο εξετάζεται ενδελεχώς σε επόμενο κεφάλαιο της παρούσας εργασίας, λόγω της επιρροής του τόσο στο τελικό κόστος (20-30% του συνολικού κόστους παραγωγής) όσο και στην συνολική παραγωγικότητα της μονάδας αλλά και λόγω της πληθώρας διαθέσιμων επιλογών σε αυτό το στάδιο. Οι κυριότερες μέθοδοι συλλογής αποτελούνται από τη φυγοκέντριση, την κροκίδωση, το φιλτράρισμα, την επίπλευση, ειδικότερα την επίπλευση με διαλυμένο αέρα (Dissolved Air Flotation - DAF), την βαρυτική καθίζηση και την ηλεκτροφόρηση. Από τις τεχνικές αυτές η φυγοκέντριση και η κροκίδωση προτιμούνται για τη συλλογή των μικροφυκών σε βιομηχανική κλίμακα, ενώ εναλλακτικές τεχνικές αποτελούν η επίπλευση με διαλυμένο αέρα (DAF) και το φιλτράρισμα. Τέλος,

εργαστηριακές έρευνες υποδεικνύουν ορισμένους νέους τρόπους συλλογής, όπως η κροκίδωση μικροφυκών με άλλου είδους μικροφύκη που εμφανίζουν το φαινόμενο της αυτοκροκίδωσης, η συλλογή των μικροφυκών με προσθήκη μαγνητικών νανοσωματιδίων στην καλλιέργεια, η χρήση υπερήχων και η γενετική τροποποίηση των μικροφυκών, ώστε αυτά να αποκτήσουν μαγνητικές ιδιότητες και να απομακρυνθούν από το διάλυμα λόγω έλξης από εξωτερικό μαγνητικό πεδίο.

Τη συλλογή ακολουθεί ξήρανση / απονέρωση των μικροφυκών ώστε να αυξηθεί η απόδοση της εξαγωγής των λιπιδίων από αυτά. Το επόμενο βήμα αποτελεί ένα στάδιο προεπεξεργασίας των συγκεντρωμένων μικροφυκών πριν την εξαγωγή των λιπιδίων από αυτά, με στόχο την αύξηση της απόδοσης της τελευταίας. Αυτό το στάδιο περιλαμβάνει την κυτταρική διάσπαση των μικροφυκών, η οποία μπορεί να επιτευχθεί είτε με μηχανικά μέσα, όπως άλεση των σωματιδίων, χρήση πρέσας, χρήση υπερήχων και ομογενοποίηση σε υψηλές πιέσεις, είτε μη μηχανικά με λύση των κυττάρων (χημική, βιολογική, ενζυμική) ή ξήρανση. Η ενδεδειγμένη, βάσει μελετών, τεχνική διάσπασης κυττάρων στην περίπτωση των μικροφυκών σε βιομηχανική κλίμακα είναι η άλεση των σωματιδίων, ενώ η ομογενοποίηση σε υψηλές πιέσεις αποτελεί μία ευρέως χρησιμοποιούμενη μέθοδο σε εργαστηριακό επίπεδο. Έπειτα λαμβάνει χώρα η εξαγωγή των λιπιδίων. Σε αυτό το στάδιο απαιτείται διαλύτης για την εξαγωγή. Οι κοινώς χρησιμοποιούμενοι διαλύτες είναι το εξάνιο και το χλωροφόρμιο, ενώ μπορεί να γίνει και συνδυασμός των δύο. Άλλες τεχνικές περιλαμβάνουν την επεξεργασία με σογιέλαιο που εφαρμόζεται ήδη στην εξαγωγή λιπιδίων από τους φυτικούς οργανισμούς που προορίζονται για την παραγωγή βιοκαυσίμων και η χρήση υπερκρίσιμων ρευστών, όπως το υπερκρίσιμο CO₂ (SCCO₂), το οποίο παρά τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζει, έχει υψηλό λειτουργικό κόστος. Το μεγαλύτερο πρόβλημα σε αυτό το στάδιο είναι η απομόνωση του διαλύτη από τα λιπίδια, μετά από την εξαγωγή αυτών από τα μικροφύκη, προς αποφυγή μόλυνσης των λιπιδίων, κάτι που οδηγεί σε μείωση της αξίας των προϊόντων της μετέπειτα επεξεργασίας αυτών. Το πρόβλημα αυτό δεν παρουσιάζεται στην περίπτωση της χρήσης υπερκρίσιμων ρευστών για την εξαγωγή, οπότε δεν υπάρχουν ανησυχίες μόλυνσης με εφαρμογή αυτής της πρακτικής.

Μετά από την παραγωγή του βιοντίζελ, υπάρχει το στάδιο της διάθεσης των προϊόντων και των παραπροϊόντων αυτής προς περαιτέρω επεξεργασία με στόχο τις διάφορες διαθέσιμες χρήσεις αυτών, όπως ζωοτροφές, τροφές για τον άνθρωπο, λιπάσματα, προϊόντα υψηλής αξίας, διάθεση γλυκερίνης, χρωστικές, φαρμακευτικά προϊόντα και άλλες εφαρμογές. Εκτός αυτών, οι διαθέσιμες επιλογές μετεπεξεργασίας εκτείνονται στην παραγωγή βιοαερίου μέσω αναερόβιας χώνευσης και την παραγωγή ηλεκτρισμού ώστε να καλυφθούν οι ενεργειακές απαιτήσεις της μονάδας παραγωγής, καθώς και την ανακύκλωση των θρεπτικών συστατικών στο σύστημα. Τέλος, άλλη μία επιλογή είναι η υγειονομική ταφή των μικροφυκών, η οποία κρίνεται ασύμφορη λόγω της μη επεξεργασίας της διαθέσιμης βιόμαζας προς προϊόντα.

iii. Αναλυτικό Διάγραμμα Ροής με Επιλογές



Σχήμα III.3.2

4. Πρώτες Ύλες & Ροές Τροφοδοσίας

i. Ηλεκτρισμός

Σε αυτό το στάδιο λαμβάνονται υπόψη οι απαιτήσεις σε ηλεκτρισμό των διαφόρων διεργασιών και οργάνων της μονάδας για την παραγωγή βιοντίζελ από μικροφύκη. Στη συνέχεια γίνονται αναφορές σε διάφορες μελέτες παραγωγής και τις απαιτήσεις αυτών και παρατίθενται πίνακες προς ισχυροποίηση των μελετών αυτών.

Στην περίπτωση της χρήσης φωτοβιοαντιδραστήρα (PBR), οι ενεργειακές απαιτήσεις αυτού αφορούν μόνο απαιτήσεις σε ηλεκτρισμό για τη λειτουργία των φυσητήρων του CO₂ και των αντλιών που χρησιμοποιούνται στην είσοδο των αποβλήτων και του ανακυκλωμένου νερού. [36]

Μελέτη της παραγωγής βιοντίζελ από το στέλεχος *Chlorella Vulgaris* έδειξε ότι το 95% των ελαίων μπορεί να εξαχθεί καταναλώνοντας 0.24 MJ ηλεκτρικής ενέργειας, 0.76 MJ θερμότητας και απώλεια εξανίου ίση με 2.4 g/kg ξηρού *C. Vulgaris*. [37]

Η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας υπολογίζεται περίπου ίση με την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τα μικροφύκη, οπότε η τελευταία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κάλυψη των αναγκών της πρώτης. [38]

Η αποδοτική χρήση της ηλιακής ενέργειας είναι δυνατό να λύσει ταυτόχρονα τα προβλήματα του υψηλού λειτουργικού κόστους, της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας και της ρύπανσης του περιβάλλοντος. Ως εκ τούτου, ο φωτισμός από τον Ήλιο μειώνει την ανάγκη χρήσης λαμπτήρων, ενώ αποδίδεται στο σύστημα μέσω της διέγερσης πλάγιων οπτικών κατόπτρων. Σε αυτήν τη διεργασία το ηλιακό φως παρέχει φωτισμό στην περίπτωση του φωτοβιοαντιδραστήρα (PBR) μέσω οπτικών ινών, γεγονός το οποίο μειώνει την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας σε 1.0 kWh. Ωστόσο, η ημερήσια διακύμανση της έντασης του ηλιακού φωτός αποτελεί το σημαντικότερο πρόβλημα στον φωτισμό του αντιδραστήρα από τον Ήλιο σε σύγκριση με τη χρήση λαμπτήρων. [34]

Η περαιτέρω μείωση της χρήσης ηλεκτρισμού από το σύστημα, επιτυγχάνεται με την προσθήκη ηλιακών πάνελ (solar panels) και ανεμογεννητριών. Τα ηλιακά πάνελ συλλέγουν την απορροφούν ακτινοβολία και στη συνέχεια την μετατρέπουν σε ηλεκτρική ενέργεια. Λόγω της αδυναμίας συνεχούς παροχής ίδιου ποσού ενέργειας από το ηλιακό φως, η ανεμογεννήτρια χρησιμοποιείται ως επιπρόσθετη πηγή ενέργειας για το σύστημα των ηλιακών πάνελ. Το σύστημα των ηλιακών πάνελ και της ανεμογεννήτριας είναι δυνατό να παράγει ολόκληρο το ποσό της ενέργειας που απαιτείται από τις πηγές φωτός LED. Η χρήση ηλιακού φωτός (ηλιακά πάνελ και κάτοπτρα) και ανεμογεννήτριας για τις ανάγκες φωτισμού του φωτοβιοαντιδραστήρα μπορεί να αποτελέσει μία οικονομικά βιώσιμη λύση για το σύστημα καλλιέργειας των μικροφυκών με μηδενική κατανάλωση ηλεκτρισμού. [34]

Στη συνέχεια παρουσιάζονται πίνακες με στοιχεία για την κατανάλωση ηλεκτρισμού στην περίπτωση χρήσης τεχνητού φωτισμού (Πίνακας Π.5 - Παράρτημα) και γενικότερα στην παραγωγική διαδικασία (Πίνακες III.4.1 και III.4.2).

Ετήσιο Ισοζύγιο Ηλεκτρικής Ενέργειας στην Παραγωγική Διαδικασία

Στάδιο	Κατανάλωση Ενέργειας (GWh/έτος)	Παραγωγή Ενέργειας από το CH ₄ (GWh/έτος)
Οριζόντιος Σωληνοειδής PBR	153	70.7
Ανοιχτή Λίμνη	8.7	70.7
Φυγοκέντριση	10.2	62.0
Χρήση Διαλύτη για την Εξαγωγή των Λιπιδίων	0.9	51.9
Μετεστεροποίηση των Λιπιδίων	0.5	-

Πίνακας III.4.1 [39]

Κατανάλωση Ηλεκτρισμού για την Παραγωγή 1kg Μικροφυκών σε Ανοιχτή Λίμνη

Διεργασία	Κατανάλωση Ηλεκτρισμού (kWh)
Τροχός (Paddlewheel)	0.200
Έγχυση CO ₂	0.0289
Άντληση	0.153
Φυγοκέντριση	0.042
Αναερόβια Χώνευση Purification	0.1332
Καύση	2.00

Πίνακας III.4.2 [39]

ii. Τοποθεσία

a. Ηλιακή Ακτινοβολία

Η ηλιακή ακτινοβολία αποτελεί έναν κρίσιμο παράγοντα για την ανάπτυξη των μικροφυκών. Τα τελευταία χρειάζονται την φωτεινή ενέργεια του Ήλιου για την αποτελεσματική λειτουργία της φωτοσύνθεσης τους. Σε περίπτωση που δεν είναι αρκετή η ηλιακή ακτινοβολία για αυτόν τον σκοπό, χρησιμοποιούνται τεχνητές πηγές φωτός, οι οποίες, όπως αναλύθηκε προηγουμένως, απαιτούν ηλεκτρική ενέργεια για τη λειτουργία τους, γεγονός που συνεπάγεται αύξηση του λειτουργικού κόστους της μονάδας, οπότε δεν αποτελεί την προτιμότερη λύση. [40]

Η ανάπτυξη των μικροφυκών απαιτεί μία μέση ηλιακή ακτινοβολία ίση τουλάχιστον με 1500 kWh/m²/έτος. Αυτό μεταφράζεται στη δυνατότητα ανάπτυξης των μικροφυκών

στις περισσότερες περιοχές του πλανήτη, οι οποίες πληρούν αυτό το κριτήριο. Τέλος, βάσει υπολογισμών, στην περίπτωση που η ηλιακή ακτινοβολία ξεπερνά σε ημερήσια βάση τις 6.0 kWh/m^2 , η αντίστοιχη μέγιστη παραγωγικότητα των μικροφυκών φτάνει τα $100 \text{ g/m}^2/\text{ημέρα}$. [40]

Χάρτης GHI (Global Horizontal Irradiation)

Η συνολική οριζόντια ακτινοβολία (Global Horizontal Irradiation - GHI) είναι η πιο σημαντική παράμετρος για την εκτίμηση της ηλιακής ενέργειας την οποία δέχεται μία περιοχή. Πιο συγκεκριμένα, η τελευταία αποτελεί το άθροισμα της άμεσης οριζόντιας ακτινοβολίας και της διεσπαρμένης οριζόντιας ακτινοβολίας.[41]

Global Horizontal Irradiation (GHI) = Direct Horizontal Irradiation (DHI) + Diffused Horizontal Irradiation (DIF)

Η DHI αποτελεί το ποσό της ακτινοβολίας το οποίο φτάνει σε μία οριζόντια επιφάνεια της Γης χωρίς απώλειες στην ατμόσφαιρα λόγω περίθλασης ή απορρόφησης. [41]

Η DIF αποτελεί το ποσό της ακτινοβολίας το οποίο φτάνει σε μία οριζόντια επιφάνεια της Γης ως αποτέλεσμα της περίθλασης της ακτινοβολίας σε μόρια του αέρα, σωματίδια αερολυμάτων, σωματίδια σύννεφων ή άλλα σωματίδια. Στην περίπτωση απουσίας ατμόσφαιρας η DIF θα ήταν ίση με το μηδέν.[41]

Ο χάρτης GHI για την Ελλάδα είναι διαθέσιμος στο παράρτημα (Εικόνα Π.1).

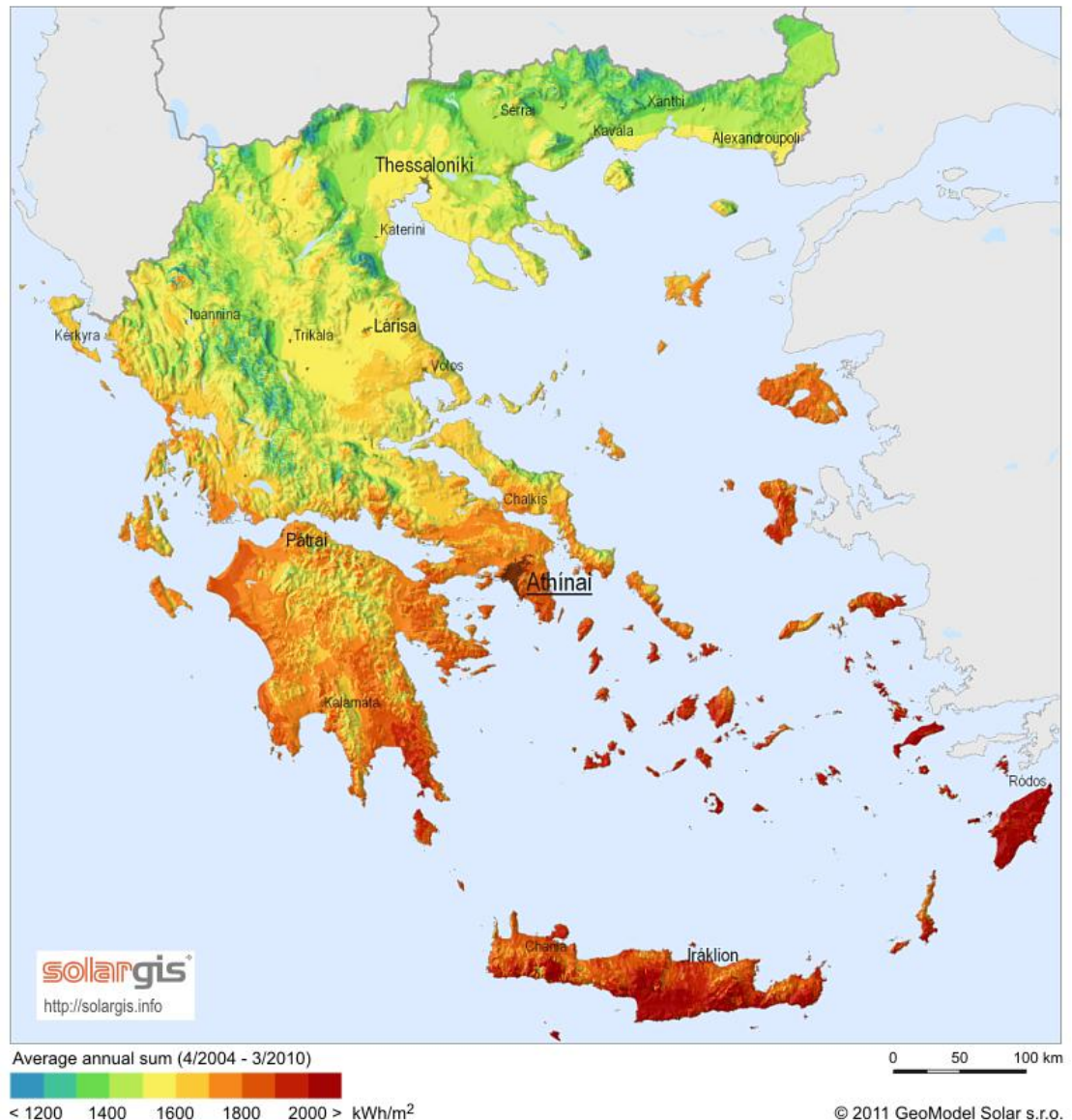
Χάρτης DNI (Direct Normal Irradiation)

Η άμεση κανονική ηλιακή ακτινοβολία (Direct Normal Irradiation - DNI) είναι μία πολύ σημαντική παράμετρος για την τοποθέτηση μονάδων αξιοποίησης της ηλιακής ενέργειας, διότι αντιπροσωπεύει το ποσό της ηλιακής ακτινοβολίας το οποίο φτάνει στην επιφάνεια της Γης χωρίς απώλειες στην ατμόσφαιρα λόγω περίθλασης ή απορρόφησης, οπότε είναι άμεσα διαθέσιμο προς αξιοποίηση. Ο χάρτης DNI για την περιοχή της Ελλάδας παρατίθεται ακολούθως. [41]

Χάρτης DNI για την Ελλάδα

Direct Normal Irradiation

Greece



Εικόνα III.4.1

Τέλος, να σημειωθεί ότι κρίνεται ως καταλληλότερη η συσχέτιση των συνολικών ωρών της ηλιακής ακτινοβολίας με την παραγωγικότητα των μικροφυκών, από τη συνολική ηλιακή ακτινοβολία που δέχεται μία περιοχή.

b. Θερμοκρασία

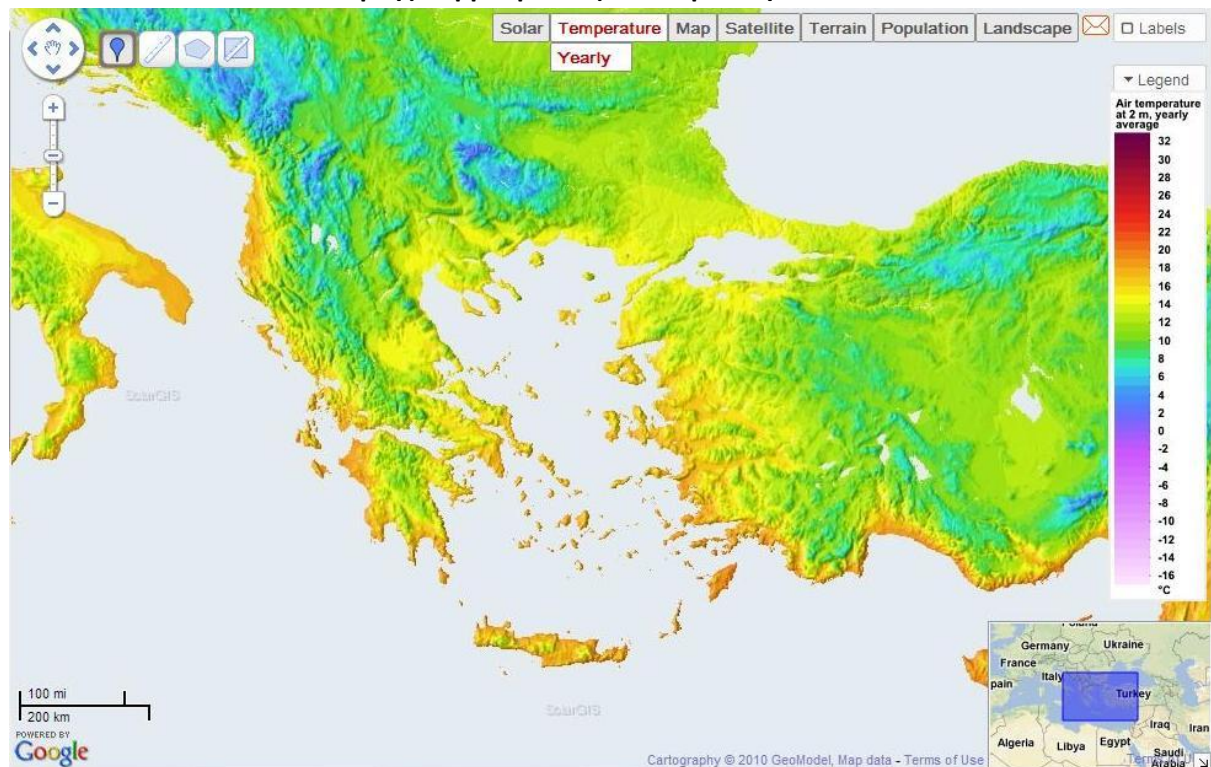
Η θερμοκρασία έχει ιδιαίτερο ρόλο στην ανάπτυξη της καλλιέργειας των μικροφυκών. Κάθε στέλεχος μικροφύκους έχει ξεχωριστό εύρος θερμοκρασιών στο οποίο η παραγωγικότητα του αποκτά τη μέγιστη δυνατή τιμή. Γενικότερα, πολύ χαμηλές θερμοκρασίες (< 15 °C), οδηγούν σε αντίστοιχες πολύ χαμηλές παραγωγικότητες, οπότε η ανάπτυξη μιας καλλιέργειας μικροφυκών υπό αυτές τις συνθήκες κρίνεται ασύμφορη. Από την άλλη πλευρά, σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες υπάρχει κίνδυνος εξάτμισης του νερού της

καλλιέργειας των μικροφυκών. Αυτές οι θερμοκρασίες συνήθως προσεγγίζουν, ή ορισμένες φορές ξεπερνούν, τους 40 °C. Σε μία πιο γενική θεώρηση, κάθε είδος μικροφύκους μπορεί να αναπτυχθεί σε θερμοκρασίες έως και 15 °C χαμηλότερες από την βέλτιστη θερμοκρασία ανάπτυξης, όμως μόνο 2 - 4 °C υψηλότερες από αυτήν, διαφορετικά υπάρχει κίνδυνος συνολικής απώλειας της καλλιέργειας. Ακόμη, κατά τη διάρκεια ορισμένων πολύ θερμών ημερών, η θερμοκρασία στον αντιδραστήρα μπορεί να φτάσει έως και 55 °C, σε αυτήν την περίπτωση κρίνεται αναγκαία η χρήση συστήματος ψύξης ώστε αυτή να επανέλθει στους 20-26 °C, αφού αυτή η θερμοκρασιακή περιοχή κρίνεται ικανοποιητική για την ανάπτυξη των μικροφυκών. Πιο συγκεκριμένα, πειραματικές μελέτες που διεξήχθησαν με χρήση του στελέχους *Chlorella vulgaris* έδειξαν ότι μείωση της θερμοκρασίας από τους 30 °C στους 25 °C οδήγησε σε αύξηση της παραγωγικότητας του μικροφύκους σε λιπίδια κατά 2.5 φορές. [42] [43]

Μία συνήθης λανθασμένη εκτίμηση είναι αυτή που ορίζει τις περιοχές με τις μεγαλύτερες μέσες θερμοκρασίες να δέχονται πολύ υψηλά ποσά ηλιακής ακτινοβολίας. Κάτι τέτοιο δεν συμβαίνει πάντοτε, λόγω της ύπαρξης σύννεφων στην ατμόσφαιρα, τα οποία περιορίζουν την εισροή των ακτίνων του ήλιου στα χαμηλότερα στρώματα αυτής, ενώ αυτές οι περιοχές διατηρούν υψηλές θερμοκρασίες και μεγάλα ποσοστά υγρασίας.

Ο χάρτης της θερμοκρασίας του αέρα για την περιοχή της Ελλάδας φαίνεται στη συνέχεια. Τα δεδομένα αντικατοπτρίζουν την μέση ετήσια θερμοκρασία και προκύπτουν από τη μελέτη της διακύμανσης της θερμοκρασίας την πρώτη δεκαετία του 21^{ου} αιώνα στην περιοχή. [2]

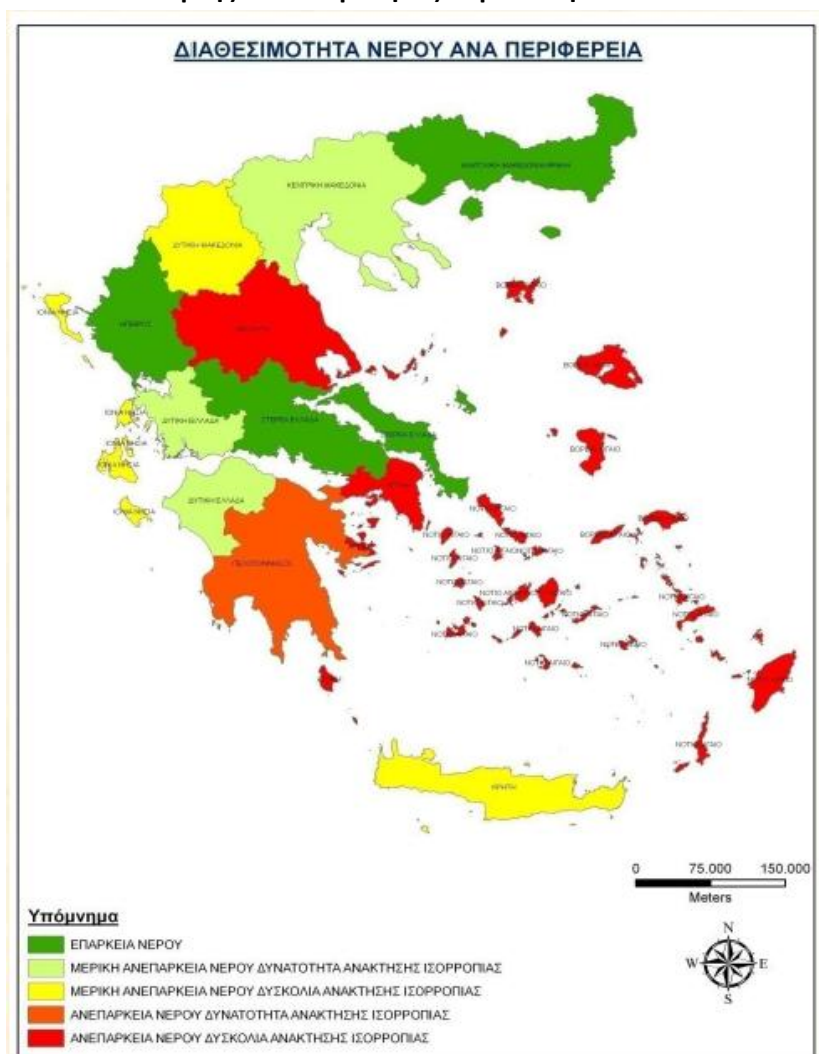
Χάρτης Θερμοκρασίας του Αέρα στην Ελλάδα



Εικόνα III.4.2

c. Νερό

Χάρτης Διαθεσιμότητας Νερού στην Ελλάδα



Εικόνα III.4.3 [44]

Το νερό της θάλασσας είναι εκείνο το οποίο συνήθως χρησιμοποιείται στην ανάπτυξη της καλλιέργειας, οπότε στις παραθαλάσσιες μονάδες υπολογίζεται μόνο το κόστος άντλησης αυτού προς την καλλιέργεια.

Το γλυκό νερό απαιτείται σε ορισμένες διεργασίες της παραγωγής, όπως η ψύξη στον φωτοβιοαντιδραστήρα (PBR) και η αναπλήρωση του ποσού του νερού που εξατμίζεται. Στην περίπτωση χρήσης γλυκού νερού για την καλλιέργεια, απαιτούνται μεγαλύτερα ποσά αυτού σε σύγκριση με το θαλασσινό νερό με αποτέλεσμα το λειτουργικό κόστος να αυξάνεται κατακόρυφα. [45]

Η ροή νερού από μια αξιόπιστη και χαμηλού κόστους παροχή αποτελεί έναν σημαντικό παράγοντα για την επιτυχή παραγωγή βιοντίζελ από μικροφύκη. Για την παραγωγή ενός λίτρου βιοκαυσίμου, απαιτείται τουλάχιστον 1.5 λίτρο νερού, ακολουθώντας την υπόθεση του λιπιδιακού περιεχομένου των μικροφυκών να ισούται με 50%. Στην πράξη, η χρήση νερού στη μονάδα παραγωγής είναι αρκετά μεγαλύτερη. [45]

Η χρήση του νερού στα ανοικτά συστήματα (λίμνες) έχει ως σκοπό την παρεμπόδιση, όσο αυτό είναι δυνατό, της εξάτμισης του νερού από το σύστημα. Στα κλειστά συστήματα, ειδικότερα στους φωτοβιοαντιδραστήρες, το νερό χρησιμοποιείται ως ψυκτικό μέσο. Επίσης, η εξάτμιση μπορεί να είναι ιδιαίτερα έντονη στα ανοικτά συστήματα μικρού βάθους (ρηχές λίμνες), στα οποία πραγματοποιείται μηχανική ανάμιξη. [45]

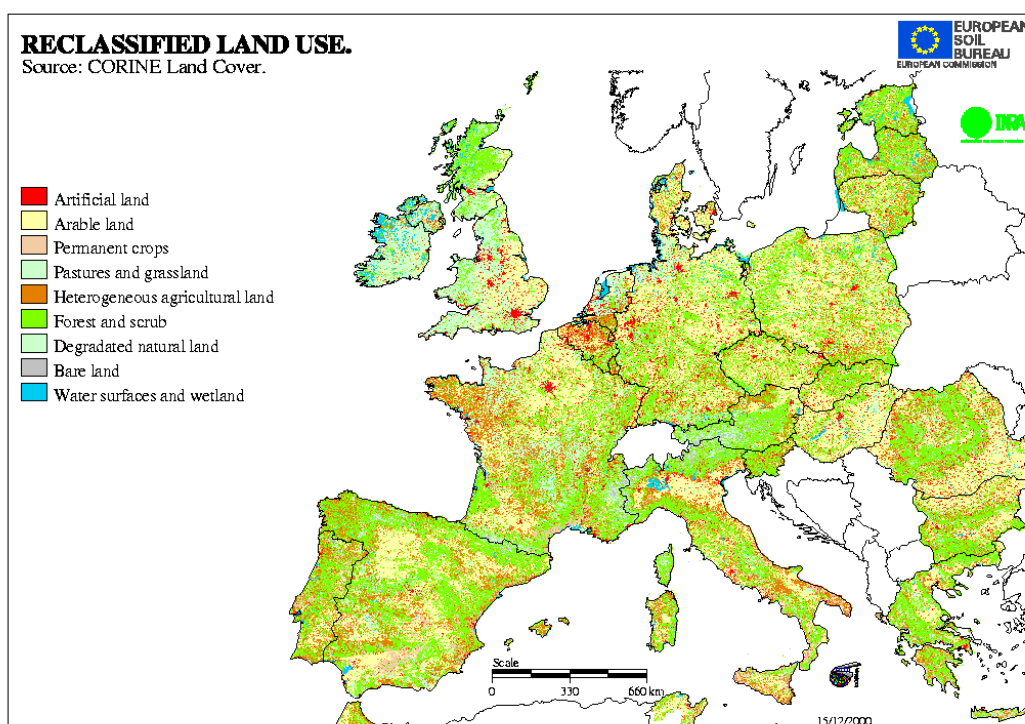
Τέλος, τα δεδομένα διαθεσιμότητας νερού στην Ελλάδα, για τις περιόδους 1998-2002 και 2003-2007, παρουσιάζονται στο παράρτημα (Πίνακας Π.8).

d. Έδαφος

Διαθεσιμότητα Εδάφους

Στον παρακάτω χάρτη φαίνεται η χρήση του εδάφους στην Ευρώπη, οπότε και στην Ελλάδα. Με αυτόν τον τρόπο υπολογίζεται η διαθεσιμότητα του εδάφους σε ορισμένες περιοχές της χώρας, όπου μπορεί να τοποθετηθεί η μονάδα παραγωγής βιοντίζελ από μικροφύκη. [46]

Χάρτης Διαθεσιμότητας Εδάφους στην Ευρώπη



Εικόνα III.4.4

Γεωγραφικό Πλάτος

Το γεωγραφικό πλάτος, στο οποίο θα τοποθετηθεί η μονάδα έχει σημασία, καθώς σε υψηλότερα γεωγραφικά πλάτη (μακριά από τον ισημερινό και κοντά στους πόλους) η παραγωγικότητα των μικροφυκών μειώνεται σύμφωνα με

πειραματικές μελέτες σε φωτοβιοαντιδραστήρα επίπεδων πάνελ. Επίσης, ο συνδυασμός της τοποθεσίας αυτής με τον λανθασμένο προσανατολισμό των πάνελ μπορεί να οδηγήσει σε μείωση έως και 50% συγκριτικά με τη σωστή επιλογή τοποθεσίας και προσανατολισμού. [47]

iii. Θρεπτικά Συστατικά

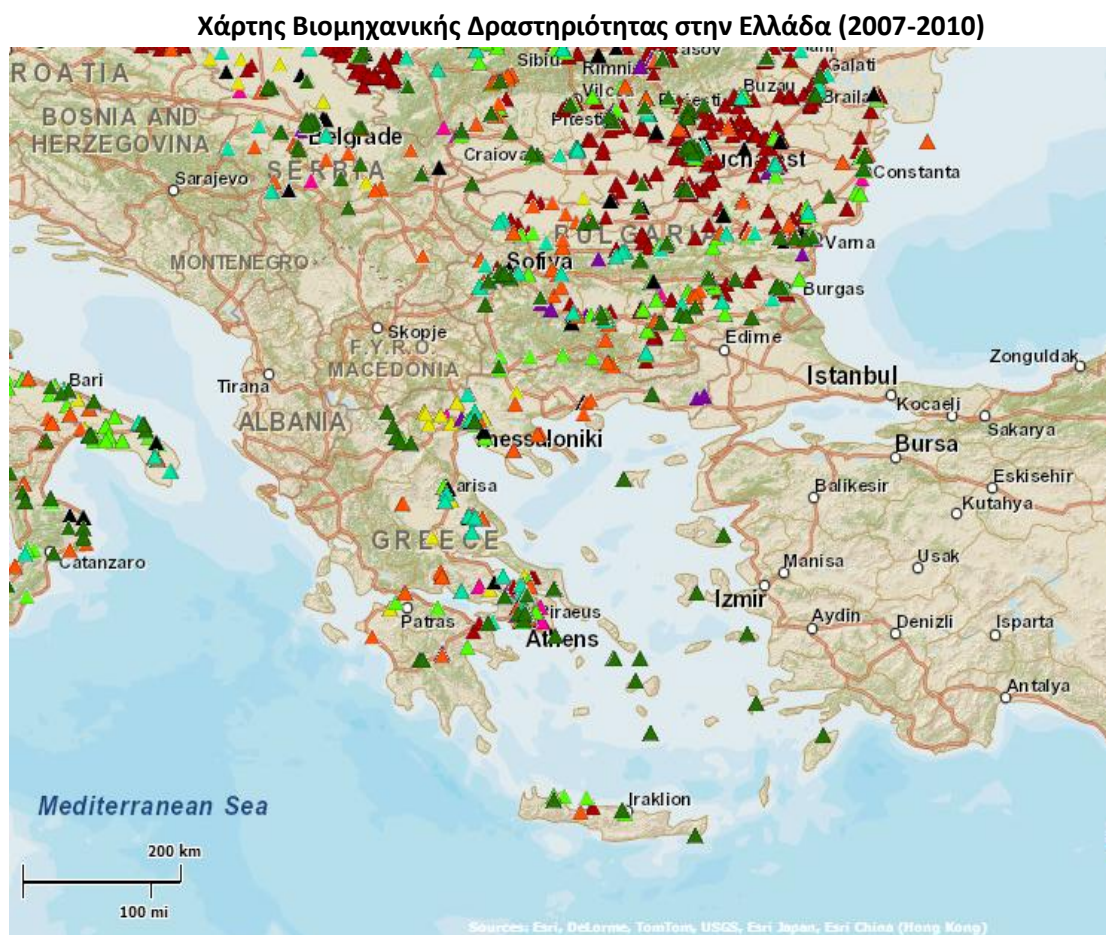
Τα θρεπτικά συστατικά τα οποία είναι απαραίτητα για την ανάπτυξη της καλλιέργειας είναι η ηλιακή ακτινοβολία, το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2), το άζωτο (N) και ο φώσφορος (P). Τα δύο τελευταία παρέχονται μέσω της ροής των αποβλήτων κοντινών περιοχών, ενώ το CO_2 από τη βιομηχανική δραστηριότητα της περιοχής, όπως για παράδειγμα η λειτουργία ενός εργοστασίου παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Τέλος, η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας διαφέρει ανάλογα με την τοποθεσία της μονάδας όπως αναλύθηκε προηγουμένως.

Ειδικότερα για το άζωτο, αναφέρεται ότι τα νιτρικά άλατα δεν αποτελούν την πλέον συμφέρουσα πηγή, διότι το κόστος του είναι υψηλό και ταυτόχρονα απαιτούν υψηλές ενέργειες μεταβολισμού ώστε να υποβαθμιστούν στο επίπεδο της αμμωνίας, γεγονός το οποίο οδηγεί σε μείωση της παραγωγικότητας κατά 5%. Τα στελέχη των μικροφυκών που μπορούν να χρησιμοποιήσουν την αμμωνία ή την ουρία ως πηγή αζώτου, είναι απαραίτητως απαιτούμενα στην περίπτωση που επιδιώκεται μέγιστη παραγωγικότητα της διεργασίας. Σε αυτήν την περίπτωση, η αμμωνία προστίθεται στο σύστημα ταυτόχρονα με την έγχυση του CO_2 σε αυτό. Οι συνθήκες χαμηλού pH, τις οποίες προκαλεί το CO_2 στο σύστημα, αποτρέπουν την εξάτμιση της αμμωνίας. Ακόμη, απαιτούνται διάφορα άλλα θρεπτικά συστατικά όπως P, K, Fe, Mn, Mg. Γενικά τα μικροφύκη περιέχουν πληθώρα θρεπτικών συστατικών συγκριτικά με τις περισσότερες από τις υπόλοιπες σοδειές για την παραγωγή βιοντίζελ. Πιο αναλυτικά, τα μικροφύκη περιέχουν άζωτο 5-12% και φώσφορο 0,3-0,12%. Οπότε, η ανακύκλωση των θρεπτικών συστατικών της βιόμαζας που απομένει, στο τέλος της διεργασίας εξαγωγής των ελαίων, αποτελεί πολύ σημαντική διαδικασία, ώστε να εξασφαλίζονται τα θρεπτικά συστατικά που απαιτούνται για την ανάπτυξη των μικροφυκών. [48]

Η ανακύκλωση που αναφέρθηκε προηγουμένως είναι δυνατό να επιτευχθεί κατά την αναερόβια χώνευση της εναπομείνουσας βιόμαζας και με την ροή των λυμάτων του χωνευτήρα να καταλήγει στην τροφοδοσία των μικροφυκών. Με αυτόν τον τρόπο, εκτός του αζώτου και του φωσφόρου, μεταφέρεται και ορισμένη ποσότητα άνθρακα στην τροφοδοσία. Η απόδοση της ανακύκλωσης των θρεπτικών συστατικών, παρότι είναι άγνωστη, αναμένεται να κυμαίνεται σε ποσοστά στην περιοχή του 90%, ή και μεγαλύτερα. Με χρήση αποδοτικής ανακύκλωσης μειώνεται, θεωρητικά, η ανάγκη αγοράς λιπασμάτων. Αυτό όμως μένει να αποδειχθεί και στην πράξη. Τέλος, συνήθως γίνεται αξιοποίηση του νιτρικού αμμωνίου και του φωσφορικού ασβεστίου ως ροές θρεπτικών συστατικών. [48] [49]

Στη συνέχεια, παρουσιάζεται μία λεπτομερής χαρτογράφηση της βιομηχανικής δραστηριότητας στην Ελλάδα, όσον αφορά στη ρύπανση του περιβάλλοντος ως αποτέλεσμα αυτής. Πιο συγκεκριμένα, η παρακάτω εικόνα αντιπροσωπεύει τη συνολική βιομηχανική δραστηριότητα την χρονική περίοδο 2007 – 2010. Ένας δεύτερος χάρτης

αποτελεί μέρος του παραρτήματος (Εικόνα Π.2) και παρουσιάζει μόνο τη ρύπανση από μονάδες επεξεργασίας αποβλήτων και αστικών λυμάτων. [50]



Εικόνα III.4.5

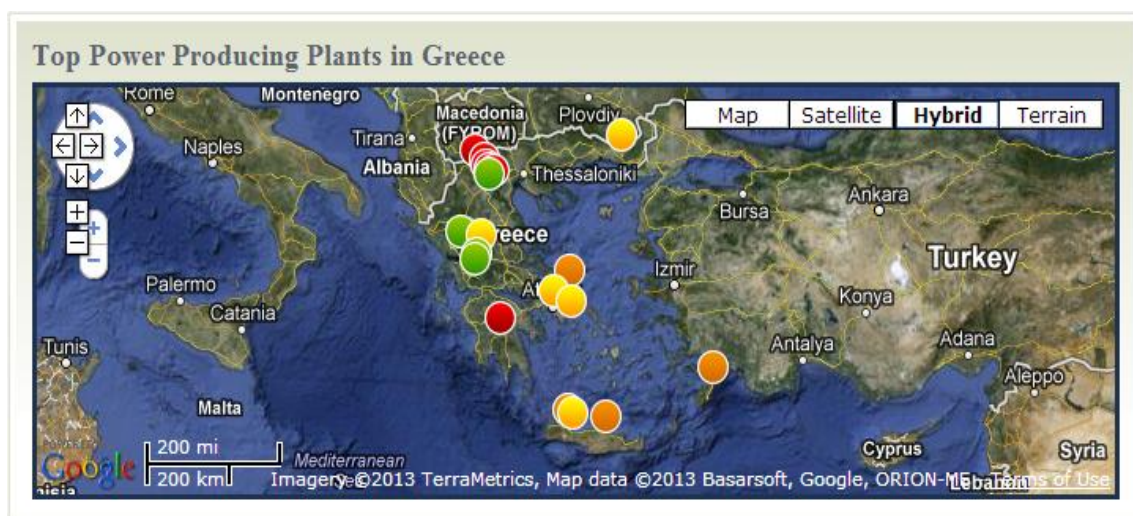
a. CO₂

Το CO₂ αποτελεί την κύρια πηγή άνθρακα (C), ο οποίος χρησιμοποιείται ως θρεπτικό συστατικό, μαζί με το άζωτο (N), τον φώσφορο (P) και το κάλιο (K), για την ανάπτυξη της καλλιέργειας των μικροφυκών. Αυτό προέρχεται κυρίως από μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, οι οποίες, ανάλογα με τη δυναμικότητα τους, απελευθερώνουν υψηλά ποσά CO₂ κατά τη διάρκεια της λειτουργίας τους. [51]

Τα μικροφύκη δύνανται να αξιοποιήσουν το CO₂ σε μεγαλύτερο ποσοστό συγκριτικά με τους περισσότερους φυτικούς οργανισμούς του εδάφους. Τα φυτά αξιοποιούν το CO₂ της ατμόσφαιρας, το οποίο βρίσκεται στον αέρα σε ποσοστό 0.03 - 0.06%. Τα μικροφύκη αξιοποιούν το CO₂ των καμινάδων βιομηχανικής δραστηριότητας, το οποίο βρίσκεται σε ποσοστό 5-15% στο αέριο αυτό μίγμα. [51]

Στη συνέχεια, παρατίθεται ένας χάρτης με αναφορές στις μονάδες που απελευθερώνουν CO₂ στην Ελλάδα, ενώ στο παράρτημα (Πίνακες Π.6, Π.7 και Σχήμα Π.1) παρουσιάζονται στοιχεία μονάδων της Δημόσιας Επιχείρησης Ηλεκτρισμού της Ελλάδας (ΔΕΗ), αναφορικά με τις εκπομπές CO₂ τα τελευταία χρόνια. [52]

Χάρτης Μονάδων Παραγωγής Ενέργειας (Μεγάλης Δυναμικότητας) στην Ελλάδα (2013)



Εικόνα III.4.6

Ο προηγούμενος χάρτης δραστηριότητας μονάδων ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα, συνοδεύεται από επίσημα στοιχεία για την απελευθέρωση CO₂ από αυτά σε ετήσια βάση. Σε αυτό το σημείο αξίζει να σημειωθεί ότι όλα τα εργοστάσια παραγωγής ενέργειας, στοιχεία για τα οποία παρατίθενται στη συνέχεια, ανήκουν στο δυναμικό των εργοστασίων της ΔΕΗ. Τα κάτωθι στοιχεία αναφέρονται στο σύνολο του έτους 2009.

Εργοστάσιο/Περιοχή	Εκπομπές CO ₂ (t)	Παραγωγή Ενέργειας (MWh)	Kg CO ₂ / MWh ^a
Άγιος Δημήτριος/Κοζάνη	12.900.000	12.253.000	1.050
Καρδιά/Πτολεμαΐδα	9.650.000	9.038.100	1.070
Πτολεμαΐς/Πτολεμαΐδα	5.030.000	4.706.900	1.070
Μεγαλόπολη	4.460.000	4.036.400	1.100
Κερατσίνι	488.240	780.420	626
Σάμος	105.260	119.080	884
Μήλος	8.038	8.842	909

a. Kg CO₂ που απελευθερώνονται ανά παραγόμενη MWh ηλεκτρισμού.

Το CO₂ παρέχει τον άνθρακα (C), ο οποίος είναι απαραίτητος για την ανάπτυξη της καλλιέργειας. Πιο αναλυτικά, βοηθά στην ανάπτυξη της καλλιέργειας με βάρος ίσο με το 50% του τελικού ξηρού βάρους των μικροφυκών. Η αποθήκευση του CO₂ στην καλλιέργεια είναι περιορισμένη λόγω της ανάπτυξης της τελευταίας μόνο σε αλκαλικό περιβάλλον, το οποίο δεν εξασφαλίζεται σε περίπτωση αλόγιστης παροχής CO₂ στην καλλιέργεια. Αν το CO₂ παρέχεται σε περίσσεια, τότε η ποσότητα η οποία δεν δεσμεύεται από την καλλιέργεια για την ανάπτυξη της, επιστρέφει στο περιβάλλον από την επιφάνεια της λίμνης. Για τον λόγο

αυτόν, απαιτείται αποδοτική χρήση της παρεχόμενης ποσότητας CO₂ στην καλλιέργεια. Οπότε, η παροχή του CO₂ είναι αναγκαίο να γίνεται ανά τακτά χρονικά διαστήματα και σε ελεγχόμενες ποσότητες. Από πλευράς μηχανικής (engineering), το CO₂ αποτελεί μία από τις μεταβλητές-κλειδιά στην βέλτιστη λειτουργία του συστήματος. [48]

Ένα παράδειγμα όπου γίνεται αντιληπτός ο παραπάνω ισχυρισμός είναι το εξής: θαλασσινό νερό με αλκαλικότητα ίση με 2.3 meq/L επιτρέπει την αποθήκευση 0.8 mmole/L ανόργανου C σε περιοχή pH που κυμαίνεται από 7.3 έως 8.8. Μία λίμνη βάθους 30 cm με μέγιστη παραγωγικότητα ίση με 5 g /m²-hr και 50% του C ως μικροφύκη (ξηρό βάρος δίχως τέφρα) απαιτεί 2.5 g C /m²-hr, ενώ διαθέσιμα στη λίμνη είναι 2.9 g C /m², υπολογίζοντας μικρές απώλειες λόγω ατμοποίησης ελάχιστης ποσότητας αυτών. Επομένως, η λίμνη χρειάζεται καινούργια παροχή C κάθε μία ώρα και το pH πρέπει να μειωθεί στο 7.3 ώστε να διασφαλίζεται η απαιτούμενη ποσότητα CO₂ για τη μέγιστη παραγωγικότητα των μικροφυκών. [48]

Το CO₂ που βρίσκεται στην ατμόσφαιρα [(~0.0387% (V/V))] δεν είναι αρκετό ώστε να χρησιμοποιηθεί ως θρεπτικό συστατικό για την ανάπτυξη των μικροφυκών με στόχο την επίτευξη αυξημένης παραγωγικότητας και υψηλών ρυθμών ανάπτυξης. Αέρια από καύση, σε βιομηχανικό επίπεδο, με περιεκτικότητα σε CO₂ τουλάχιστον 15% (V/V) μπορούν να προσφέρουν την απαιτούμενη ποσότητα CO₂ για την ανάπτυξη των μικροφυκών. Επίσης, καμινάδες βιομηχανιών με περιεκτικότητα σε CO₂: 5 – 15% (V/V) μπορούν να εισαχθούν άμεσα στην καλλιέργεια των μικροφυκών στον φωτοβιοαντιδραστήρα ή τη λίμνη, χωρίς καμία μετατροπή. [53]

Παρεμπόδιση Αναστολής Καλλιέργειας από τα NO_x και SO_x

Εκτός του CO₂, στο αέριο μίγμα της καμινάδας βιομηχανικής δραστηριότητας (π.χ. παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας) περιέχονται οξείδια του αζώτου και οξείδια του θείου. Αυτά αναστέλλουν την μικροβιακή ανάπτυξη των μικροφυκών, αν δεν ελεγχθούν οι συνθήκες της καλλιέργειας των τελευταίων. Οι συνθήκες αυτές αφορούν κυρίως στο pH, αλλά και στη μικροβιακή πυκνότητα καθώς και στον ρυθμό τροφοδοσίας της καλλιέργειας με αέριο μίγμα από την καμινάδα, ως πηγή άνθρακα από το CO₂. [54]

Ρύθμιση του pH

Ο έλεγχος και η ρύθμιση του pH έχει ως στόχο την παρεμπόδιση της αναστολής της καλλιέργειας από τα οξείδια του αζώτου και του θείου. Πειράματα που διενεργήθηκαν για αυτόν τον σκοπό έδειξαν ότι ο έλεγχος και η ρύθμιση του pH, ώστε αυτό να μην ελαττώνεται κάτω του 3.0 αλλά να μένει κοντά στο 7.0, συνήθως με χρήση αλκαλικού διαλύματος (π.χ. NaOH), αποτελεί έναν αποτελεσματικό τρόπο παρεμπόδισης της δράσης των οξειδίων του αζώτου και του φωσφόρου (NO_x, SO_x) ως αναστολέων. Ακόμη και μίγματα πλούσια σε NO (300 ppm), μπορούν να διοχετευθούν απευθείας στην καλλιέργεια με την προϋπόθεση συνεχούς ελέγχου του pH. Η ανάπτυξη των μικροφυκών σε αυτήν την περίπτωση είναι ίδια με αυτήν όταν το αέριο μίγμα περιέχει μόνο CO₂. [54]

Η ρύθμιση του pH είναι δυνατόν να επιτευχθεί με προσθήκη αλκαλικού διαλύματος (π.χ. NaOH), κάτι το οποίο συντελεί στην αύξηση του λειτουργικού κόστους, αλλά και στην

διαχείριση της χημικής ένωσης ως απόβλητο της παραγωγικής διαδικασίας. Παρόλα αυτά η ανάπτυξη των μικροφυκών σε ανοικτές λίμνες οδηγεί σε αύξηση του pH σε 10-11 λόγω της δέσμευσης του CO₂. Αυτή η αύξηση του pH είναι επιθυμητή διότι απενεργοποιεί τους παθογόνους μικροοργανισμούς της απορροής του βιολογικού καθαρισμού, όμως μπορεί να αναστείλει και την ανάπτυξη των μικροφυκών. Επίσης, το pH επηρεάζει την απομάκρυνση του αζώτου και του φωσφόρου με την εξάτμιση της αμμωνίας και την κατακρήμνιση των ορθοφωσφορικών ιόντων σε pH 9-11. Τέλος, η ρύθμιση του pH είναι αρκετά εύκολη στα βιολογικά συστήματα, οπότε δεν παρουσιάζονται προβλήματα στην ανάπτυξη των μικροφυκών από αυτόν τον παράγοντα. [53] [43]

Άλλες Μέθοδοι Αναστολής της Δράσης των Παρεμποδιστών

Η αύξηση των κυττάρων μικροφυκών που εμβολιάζονται στο μέσο της καλλιέργειας αυξάνει τα όρια αντοχής αυτών σε τοξικούς παράγοντες όπως τα NO_x και SO_x. Για παράδειγμα, όταν αέριο μίγμα καμινάδας με περιεχόμενο SO₂ σε συγκέντρωση 150 ppm διοχετεύεται σε μέσο καλλιέργειας το οποίο αρχικά περιέχει μικροφύκη του είδους *Chlorella* με πυκνότητα 0.1 g/L, υπάρχει πλήρης αναστολή της ανάπτυξης. Στην περίπτωση που η πυκνότητα των κυττάρων αυξηθεί σε 0.5 g/L δεν εμφανίζονται προβλήματα αναστολής της κυτταρικής ανάπτυξης ακόμη και σε μίγματα που περιέχουν 300 ppm NO. Όμως, αυτή η μέθοδος δεν συνιστάται για χρήση σε βιομηχανική κλίμακα, αφού αυξημένη συγκέντρωση μικροφυκών στο μίγμα δεν επιτρέπει τη διείσδυση των ακτίνων του Ηλίου στα κατώτερα στρώματα του συστήματος. [54]

Επιπρόσθετα, η ρύθμιση του ρυθμού τροφοδοσίας του αέριου μίγματος της καμινάδας στο μέσο της καλλιέργειας, έδειξε ικανοποιητικά αποτελέσματα ως προς την αποφυγή δράσεων αναστολής από τα NO_x, SO_x. Ακόμη και στην περίπτωση σχετικά πυκνού σε SO₂ μίγματος (250 ppm) η ανάπτυξη των κυττάρων έλαβε χώρα χωρίς προβλήματα αναστολής, όταν ο αερισμός ήταν σχετικά χαμηλός, δηλαδή 0.1 nvm ή ακόμη λιγότερο. Σε αυτήν την περίπτωση, ο ρυθμός ανάπτυξης ανήλθε σε 1.2 g/(L d), αριθμός ο οποίος αντιστοιχεί στο 80% της ανάπτυξης με παροχή μίγματος το οποίο περιέχει μόνο CO₂ και καθόλου NO_x, SO_x. [54]

Τέλος, το είδος *Chlorella*, το οποίο χρησιμοποιείται σε αυτή τη μελέτη, αναπτύσσεται με CO₂ που μπορεί να φτάνει έως και 40% κατ' όγκο περιεκτικότητα στο μίγμα τροφοδοσίας. [54]

b. Άζωτο (N)

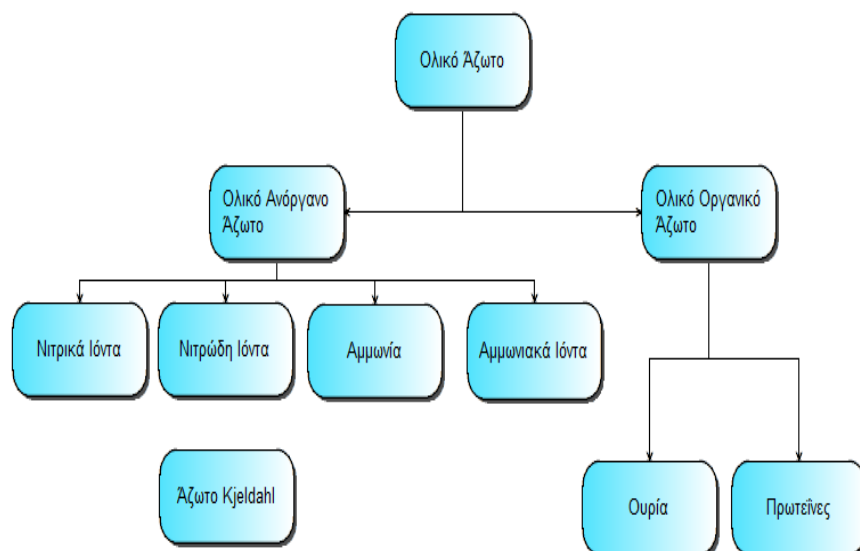
Το άζωτο αποτελεί ένα από τα κύρια θρεπτικά συστατικά που χρησιμοποιούνται από τα μικροφύκη για την ανάπτυξη τους. Ως εκ τούτου, η γνώση της μορφής με την οποία βρίσκεται στα απόβλητα καθώς επίσης και των συγκεντρώσεων του σε οποιαδήποτε μορφή, είναι απαραίτητες για τον καθορισμό του ποσού των αποβλήτων που παρέχονται προς ανάπτυξη της καλλιέργειας των μικροφυκών. [55]

Πιο συγκεκριμένα, στην περίπτωση των απορροών των αστικών λυμάτων υπάρχουν δεδομένα μετρήσεων τριών μορφών αποθηκευμένου αζώτου. Αυτές είναι το ολικό άζωτο (Total Nitrogen, TN), το ανόργανο άζωτο (Total Inorganic Nitrogen, TIN) και το οργανικό

άζωτο (Total Organic Nitrogen, TON). Το ολικό άζωτο (TN) αποτελεί το άθροισμα του ανόργανου (TIN) και του οργανικού αζώτου (TON). Το ανόργανο άζωτο (TIN) περιλαμβάνει τα νιτρώδη (NO_2^-) και τα νιτρικά (NO_3^-) άλατα. Στο οργανικό άζωτο (TON) ανήκει η αμμωνία στην αέρια μορφή (NH_3) ή στην ιοντική της μορφή (NH_4^+), η ουρία (NH_2CONH_2) και το άζωτο των πρωτεϊνών. Το αμμωνιακό και το οργανικό άζωτο αποτελούν το άζωτο Kjeldahl (TKN). Στο σχήμα III.4.1 και στον πίνακα III.4.1 παρέχονται χρήσιμες πληροφορίες για όλους τους συμβολισμούς και τις μορφές του αζώτου. [55]

Τα κύρια συστατικά του οργανικού κλάσματος του αζώτου το οποίο βρίσκεται στα απόβλητα σε διαλυτή ή σωματιδιακή μορφή, αποτελούν τα αμινοξέα, οι αμινοσακχαρίτες, οι πρωτεΐνες και η ουρία (NH_2CONH_2). Ανεπαρκής ποσότητα αζώτου στα αστικά λύματα μπορεί πολλές φορές να επιβάλλει την προσθήκη αζώτου προκειμένου να διευκολυνθεί η επεξεργασία τους. Η κατανομή της αμμωνίας και των αμμωνιακών ιόντων στα υγρά απόβλητα εξαρτάται συνήθως από το pH. Στα απόβλητα των οποίων το pH είναι χαμηλό κυριαρχεί το άζωτο με τη μορφή των αμμωνιακών ιόντων (NH_4^+), ενώ σε υψηλότερες τιμές pH κυριαρχεί η αμμωνία (NH_3). Τα νιτρώδη ιόντα (NO_2^-) τα οποία είναι ιδιαίτερα τοξικά και αποτελούν δείκτη προϋπάρχουσας ρύπανσης στα φυσικά νερά, σπάνια υπάρχουν σε υψηλή συγκέντρωση στα υγρά απόβλητα. Συνήθως οξειδώνονται πολύ γρήγορα σε νιτρικά ιόντα (NO_3^-). Τα νιτρώδη που τυχόν βρίσκονται στις εκροές των εγκαταστάσεων επεξεργασίας αστικών λυμάτων οξειδώνονται από το χλώριο κατά την απολύμανση και αυτό οδηγεί στην αύξηση της δόσης του χλωρίου και επομένως και στο κόστος της απολύμανσης. Η υπερίσχυση των νιτρικών (NO_3^-) ιόντων, τα οποία αποτελούν τη πιο οξειδωμένη μορφή του αζώτου στα υγρά απόβλητα, υποδηλώνει ότι τα απόβλητα σταθεροποιήθηκαν αναφορικά με τις απαιτήσεις σε οξυγόνο. [55]

Το αζωτούχο (TKN) ρυπαντικό φορτίο των φρέσκων ανεπεξεργαστων αστικών λυμάτων κυμαίνεται από 0,035 – 0,1 g/L ή 10 g/κατ. ημ. Οι ευαίσθητοι φυσικοί αποδέκτες επεξεργασμένων εκροών απαιτούν πάντα την απομάκρυνση του αζώτου από τα υγρά απόβλητα (δηλαδή $\text{N}_{\text{Tot}} < 0,003 \text{ g/L}$), επειδή το άζωτο όπως και ο φώσφορος σαν θρεπτικά συστατικά, προκαλούν το πρόβλημα του ευτροφισμού και τελικά της αποξυγόνωσης των φυσικών νερών. Ο ευτροφισμός συνίσταται στην υπερβολική αύξηση της πρωτογενούς παραγωγικότητας μιας υδάτινης μάζας, με δυσμενή αποτελέσματα στα φυσικοχημικά και βιολογικά χαρακτηριστικά των νερών και της χρήσης της. [55]



Σχήμα III.4.1

Μορφή του Αζώτου	Συμβολισμός	Περιλαμβάνει
Αμμωνία	NH_3	NH_3
Αμμωνιακά Ιόντα	NH_4^+	NH_4^+
Ολικό Αμμωνιακό Αζώτο	TAN	$\text{NH}_3 + \text{NH}_4^+$
Νιτρώδη Ιόντα	NO_2^-	NO_2^-
Νιτρικά Ιόντα	NO_3^-	NO_3^-
Ολικό Ανόργανο Αζώτο	TIN	$\text{NH}_3 + \text{NH}_4^+ + \text{NO}_2^- + \text{NO}_3^-$
Ολικό Αζώτο Kjeldahl	TKN	Οργανικό N + $\text{NH}_3 + \text{NH}_4^+$
Οργανικό Αζώτο	Οργανικό N	TKN - ($\text{NH}_3 + \text{NH}_4^+$)
Ολικό Αζώτο	TN	Οργανικό N + TIN

Πίνακας III.4.1

c. Φώσφορος (P)

Ο Φώσφορος αποτελεί τη δεύτερη κύρια πηγή θρεπτικών συστατικών για την ανάπτυξη της καλλιέργειας των μικροφυκών. Η συγκέντρωση του φωσφόρου στα φρέσκα ανεπεξέργαστα αστικά λύματα κυμαίνεται από 0,005 – 0,030 g/L. Στις οργανικές ενώσεις των λυμάτων ανήκει περίπου το 75 % του συνολικά υπάρχοντος φωσφόρου, ενώ ο υπόλοιπος (25 % περίπου) βρίσκεται στα υγρά απόβλητα κυρίως με τη μορφή των ορθοφωσφορικών (PO_4^{3-} , HPO_4^{2-} , H_2PO_4^- , H_3PO_4) διαλυτών ιόντων από 70 - 90 % και πολυφωσφορικών ($\text{P}_2\text{O}_7^{2-}$) ιόντων τα οποία είναι περίπλοκα μόρια, αλλά και με τη μορφή άλλων οργανικών φωσφορικών ενώσεων. Ο οργανικά δεσμευμένος φώσφορος δεν έχει ιδιαίτερη σημασία για τα αστικά λύματα, τα δε ορθοφωσφορικά ιόντα χρησιμεύουν για το βιολογικό μεταβολισμό χωρίς να διασπώνται περαιτέρω. [55]

Τα αστικά λύματα επιβαρύνονται με φώσφορο (P) κατά 2 – 4 g/κατ. ημ. Ένα ποσοστό της εισερχόμενης ποσότητας του φωσφόρου (10% - 30%) απομακρύνεται από τους μικροοργανισμούς κατά τη διάρκεια της βιολογικής επεξεργασίας στις δεξαμενές

αερισμού, ενώ το ένα πολύ μεγάλο ποσοστό των φωσφορικών ενώσεων μετατρέπεται σε διαλυτά ορθοφωσφορικά ιόντα. [55]

Εξαιτίας ορισμένων προβλημάτων που δημιουργεί ο φώσφορος στα επιφανειακά νερά, όπως το φαινόμενο του ευτροφισμού, πρέπει να απομακρυνθεί από τα υγρά απόβλητα. Η συγκέντρωσή του στην εκροή των εγκαταστάσεων επεξεργασίας αστικών λυμάτων καθορίζεται από τον χαρακτηρισμό και τις ωφέλιμες χρήσεις του αποδέκτη όπως ισχύει και για τους άλλους ρύπους. Αυτό σημαίνει ότι ο βαθμός απόδοσης του συστήματος και η διαδικασία επεξεργασίας που επιλέγεται είναι άμεσα συνυφασμένη με τον αποδέκτη και τις χρήσεις του. Σε γενικές γραμμές, όταν πρόκειται για ευαίσθητους αποδέκτες, δηλαδή γλυκά επιφανειακά νερά, θεωρείται ικανοποιητική η ποσότητα του φωσφόρου στην απορροή όταν αυτή δεν υπερβαίνει τα 0,002 g/L. Η τεχνική απομάκρυνσης του φωσφόρου παρουσιάζει απόδοση η οποία εκτιμάται στην περιοχή 90% - 95%. [55]

Τέλος, στον επόμενο πίνακα φαίνεται η σύσταση διαφόρων ειδών ροών αποβλήτων σε άζωτο (Ολικό Άζωτο Kjeldahl - TKN) και φώσφορο (Ολικός Φώσφορος – TP). [55]

Τύπος	Άζωτο (TKN) (mg/L)	Φώσφορος (TP) (mg/L)	N:P (mol/mol)
Αστικά (Μικρή Δυναμικότητα)	20 ^a	4	11
Αστικά (Μέση Δυναμικότητα)	40 ^a	8	11
Αστικά (Μεγάλη Δυναμικότητα)	85 ^a	15	13
Εκτροφή Βοοειδών	63	14	10
Γαλακτοκομικά Προϊόντα	185	30	14
Εκτροφή Πουλερικών	802	50	36
Εκτροφή Χοίρων ¹	2430	324	17
Εκτροφή Χοίρων ²	895	168	12
Παραγωγή Καφέ	85	38 ^b	5
Παραγωγή Κωκ (Coke Plant)	757	0.5 ^b	3352
Αποστακτήριο	2700 ^a	680 ^b	9
Χαρτοποιία (Paper Mill)	11 ^a	0.6	41
Βυρσοδεψία (Tannery)	273	21 ^b	29
Υφαντουργία	90	18	141
Οινοποιία	110	52	5

Πίνακας III.4.2 [56]

a: TN (Ολικό Άζωτο) αντί TKN

b: PO₄-P αντί TP

1: πηγή 1 κατά Christenson, Sims (2011) [56]

2: πηγή 2 κατά Christenson, Sims (2011) [56]

d. Χρήση Απορροής Βιολογικού Καθαρισμού ως Πηγή Θρεπτικών Συστατικών

Τα μικροφύκη μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την διαχείριση των αποβλήτων του βιολογικού καθαρισμού ταυτόχρονα με την αξιοποίηση της παραγόμενης βιόμαζας από αυτήν τη διαδικασία για την παραγωγή βιοντίζελ, ή άλλων προϊόντων. Με αυτή τη μέθοδο, ελαχιστοποιούνται οι απαιτήσεις σε γλυκό νερό. [51]

Ευτροφισμός

Η διαχείριση των ροών των αποβλήτων συνίσταται στην απομάκρυνση του αζώτου και του φωσφόρου, συστατικά τα οποία αποτελούν κύριους παράγοντες πρόκλησης του φαινομένου του ευτροφισμού στα υδάτινα οικοσυστήματα, όπως λίμνες και ποταμοί. Ακόμη, στα οικοσυστήματα αυτά, υπεύθυνα για τον ευτροφισμό είναι τα φύκη, τα οποία δεσμεύουν το άζωτο και τον φώσφορο, με αποτέλεσμα την ανάπτυξη τους με τη χρήση του διαθέσιμου οξυγόνου, το οποίο στερούνται οι υπόλοιποι υδρόβιοι οργανισμοί οπότε πεθαίνουν από ασφυξία. Επομένως, η δέσμευση των συστατικών αυτών σε ελεγχόμενο περιβάλλον από τα μικροφύκη, δεν παρουσιάζει τις προαναφερθείσες απειλές για το οικοσύστημα. [51] [57]

Μελέτες έδειξαν ότι το στέλεχος *Chlorella vulgaris* επιτυγχάνει απομάκρυνση του αζώτου και του φωσφόρου από τις ροές των αποβλήτων με μέση απόδοση 72% για το άζωτο και 28% για τον φώσφορο ($3 - 8 \text{ mg/L NH}_4^+$ και $1.5 - 3.5 \text{ mg/L PO}_4^{3-}$). Γενικά, τα μικροφύκη μπορούν να δεσμεύουν το άζωτο και τον φώσφορο από την απορροή του βιολογικού καθαρισμού σε μεγάλα ποσοστά, υπό διάφορες συγκεντρώσεις, με συνεχή παροχή CO_2 στο σύστημα. Επίσης, μελέτες που διεξήχθησαν με στόχο την απομάκρυνση του φωσφόρου και του αζώτου από απόβλητα αγροτικών δραστηριοτήτων στην Κολομβία με χρήση των στελεχών *Chlorella vulgaris* και *Scenedesmus dimorphus*, έδειξαν ότι αμφότερα επέτυχαν υψηλά ποσοστά απομάκρυνσης των θρεπτικών συστατικών N, P. [48] [58]

Άλλες Περιπτώσεις Επεξεργασίας Αποβλήτων

Επιπρόσθετα, ο συνδυασμός της διαχείρισης της κοπριάς των ζώων που προέρχεται από τη λειτουργία των βιοδιύλιστηρίων με την ανάπτυξη των μικροφυκών οδηγεί στην παραγωγή βιόμαζας και την παραγωγή βιοαερίου. Ακόμη, στην περίπτωση που η συγκέντρωση των μικροφυκών στην καλλιέργεια αυξηθεί σημαντικά, η τελευταία μπορεί να χρησιμοποιηθεί στο στάδιο της τριτογενούς επεξεργασίας των αποβλήτων, διότι με αύξηση της συγκέντρωσης των μικροφυκών το φως δεν εισχωρεί στα κατώτερα στρώματα της καλλιέργειας, οπότε δεν ωφελείται η ανάπτυξη των μικροφυκών. [29]

Απομάκρυνση Παθογόνων Μικροοργανισμών

Σε εργαστηριακή κλίμακα, και σε πιλοτική, είναι δυνατή η αποστείρωση των αποβλήτων ώστε να μην περιέχουν βακτήρια και πρωτόζωα. Αυτή μπορεί να επιτευχθεί με χρήση χάρτινου φίλτρου και στη συνέχεια αυτόκλειστου. Παρόλα αυτά, η δεύτερη

διεργασία είναι δύσκολο να επιτευχθεί σε βιομηχανική κλίμακα και σε μονάδα συνεχούς λειτουργίας. Όμως, σε βιομηχανική κλίμακα, οι παθογόνοι μικροοργανισμοί και τα βακτήρια απομακρύνονται κατά την επεξεργασία των μικροφυκών, ως εκ τούτου τα μικροφύκη μπορούν να χρησιμοποιηθούν στη δέσμευση τοξικών ιόντων και μορίων. Πιο αναλυτικά, τα μικροφύκη μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην απομάκρυνση ενώσεων του αζώτου όπως, NH_4^+ και NO_3^- καθώς και βαρέων μετάλλων από τα απόβλητα. Για τα βαρέα μέταλλα, ο ρυθμός απομάκρυνσης υπολογίζεται 15 mg βαρέων μετάλλων ανά g βιόμαζας μικροφυκών με 99% απόδοση απομάκρυνσης. [29] [58] [43]

Τα μικροφύκη είναι ευαίσθητα στις υψηλές συγκεντρώσεις αμμωνίας συνδυασμένες με υψηλές τιμές pH, διότι η αμμωνία επιδρά στη φωτοσυνθετική λειτουργία των μικροφυκών με αποτέλεσμα την παραγωγή μεγαλύτερης, από την προβλεπόμενη, ποσότητας οξυγόνου.

ε. Λιπάσματα

Εκτός της απορροής βιολογικού καθαρισμού, τα θρεπτικά συστατικά μπορούν να προέρχονται από λιπάσματα αγροτικών δραστηριοτήτων, τα οποία αποτελούν μία πλούσια πηγή αζώτου και φωσφόρου. Σε αυτήν την περίπτωση αυξάνεται το κόστος παραγωγής, οπότε η χρήση τους κρίνεται οικονομικά ασύμφορη στην περίπτωση παραγωγής προϊόντων χαμηλής αξίας όπως το βιοντίζελ. [53]

Δεδομένα Μονάδων Επεξεργασίας Αστικών Λυμάτων

Τα θρεπτικά συστατικά τα οποία αξιοποιούνται από την καλλιέργεια των μικροφυκών για την ανάπτυξη τους μπορούν να προέρχονται από τις μονάδες επεξεργασίας αστικών λυμάτων. Πιο αναλυτικά, οι απορροές, των κοντινών στη μονάδα παραγωγής, βιολογικών καθαρισμών μεταφέρονται μέσω αντλιών στην καλλιέργεια των μικροφυκών. Η ανάπτυξη της καλλιέργειας επιτυγχάνεται με την αξιοποίηση του αζώτου και του φωσφόρου που περιέχονται στις απορροές του βιολογικού καθαρισμού. [55]

Τα προηγούμενα οδηγούν στην αναζήτηση δεδομένων για τις απορροές των μονάδων επεξεργασίας αστικών λυμάτων. Ειδικότερα, στην περίπτωση που εξετάζεται, κρίνεται αναγκαία η εύρεση των συνολικών απορροών καθώς και της σύστασης τους και ειδικότερα του περιεχόμενου τους σε άζωτο και φώσφορο. [55]

Χαρακτηριστικά Τυπικών Αστικών Λυμάτων

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ	ΡΥΠΑΝΣΗ (g/κατ. ημ.)	ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ (g/L)
Ολικά Στερεά	100-150	0,68-1
Πτητικά Στερεά	65-85	0,38-0,5
Αιωρούμενα Στερεά	35-50	0,2-0,29
Οργανική Ύλη ως BOD ₅	50-70	0,2-0,4
Οργανική Ύλη ως COD	115-125	0,68-0,73
Ολικό Άζωτο	6-17	0,035-0,1

Αμμωνία	1-3	0,006-0,018
Νιτρώδη & Νιτρικά	<1	<0,005
Ολικός Φώσφορος	2-4	0,006-0,024
Ολικά Κολοβακτηριοειδή	-	10 ⁷ -10 ⁹ αποικ./mL
Κολοβακτηριοειδή Κοπράνων	-	10 ⁵ -10 ⁷ αποικ./mL

Πίνακας III.4.3

Τυπικές Συγκεντρώσεις Απορροής Μονάδας Επεξεργασίας Αστικών Λυμάτων

Οι παρακάτω τιμές προκύπτουν από τις απαιτήσεις για απορρίψεις από σταθμούς επεξεργασίας αστικών λυμάτων βάσει της πλέον πρόσφατης οδηγίας της Ε.Ε. (21 Μαΐου 1991). [59]

Μέτρηση	Απαίτηση
Βιολογικά Απαιτούμενο Οξυγόνο (BOD ₅) ^a	25 mg/L O ₂
Χημικά Απαιτούμενο Οξυγόνο (COD) ^a	125 mg/L O ₂
Σύνολο Αιωρούμενων Σωματιδίων (SS)	35 mg/L
	σε ορεινές περιοχές με υψηλό υψόμετρο για οικισμούς άνω των 10.000 ΙΚ.
	60 mg/L
	σε ορεινές περιοχές με υψηλό υψόμετρο για οικισμούς από 2.000 έως 10.000 ΙΚ.
Ολικό Άζωτο (TN) ^b	15 mg/L
Ολικός Φώσφορος (TP) ^b	2 mg/L

a. Για πληθυσμό 2.000 - 10.000 ΙΚ

b. Για πληθυσμό 10.000 - 100.000 ΙΚ

Πίνακας III.4.4

Ο πληθυσμός των πόλεων, σύμφωνα με στοιχεία της απογραφής που πραγματοποιήθηκε το 2011, στις οποίες εξετάζεται η εγκατάσταση της μονάδας φαίνεται στον παρακάτω πίνακα. Η γνώση του πληθυσμού είναι απαραίτητη για τον υπολογισμό της δυναμικότητας των μονάδων επεξεργασίας αστικών λυμάτων στις περιοχές αυτές. [60]

Πόλη	Πληθυσμός
Κερασίνη	91.090
Πτολεμαΐδα	45.450
Σάμος	32.760
Μεγαλόπολη	11.030
Μήλος	4.960

Πίνακας III.4.5

iv. Είδη Μικροφυκών

Το είδος *Chlorella* αποτελεί μία πολύ καλή επιλογή για την καλλιέργεια του με σκοπό την παραγωγή βιοντίζελ. Αυτό συμβαίνει διότι, αν και αρκετά είδη έχουν ανάλογες τιμές περιεχόμενου σε λιπίδια και παραγωγικότητας σε λιπίδια και βιόμαζα, υπάρχουν και άλλοι παράγοντες οι οποίοι λαμβάνονται υπόψη κατά την επιλογή του κατάλληλο είδους μικροφύκους για την παραγωγή βιοντίζελ. Για παράδειγμα, η ικανότητα του μικροφύκους να αναπτύσσεται χρησιμοποιώντας τα παρεχόμενα θρεπτικά συστατικά και υπό πληθώρα διαφορετικών συνθηκών, οι οποίες δεν ευνοούν την ανάπτυξη άλλων ειδών μικροφυκών με ικανά ποσά περιεχόμενου σε λιπίδια και παραγωγικότητας σε λιπίδια και βιόμαζα για την παραγωγή βιοντίζελ. Τέλος, το στέλεχος *Chlorella vulgaris* έχει πολύ γρήγορο ρυθμό διπλασιασμού συγκριτικά με τα υπόλοιπα είδη μικροφυκών (περίπου 8 ώρες). [2] [31] [61]

Σύγκριση Μικροφυκών με Άλλες Πηγές για Παραγωγή Βιοντίζελ

Φυτική Προέλευση	Σπόρος: Περιεχόμενο σε Έλαια	Παραγωγή Ελαίου	Χρήση εδάφους	Παραγωγικότητα Βιοντίζελ
	(% oil by wt in biomass)	(m ³ oil/m ² year)	(m ² year/kg biodiesel)	(kg biodiesel/m ² year)
Καλαμπόκι / Αραβόσιτος (<i>Zea mays L.</i>)	44	0,0000172	66	0,152
Κάναβις (<i>Cannabis sativa L.</i>)	33	0,0000363	31	0,321
Σόγια (<i>Glycine max L.</i>)	18	0,0000636	18	0,562
<i>Jatropha (Jatropha curcas L.)</i>	28	0,0000741	15	0,656
<i>Camelina (Camelina sativa L.)</i>	42	0,0000915	12	0,809
Canola / Ελαιοκράμβη (<i>Brassica Napus L.</i>)	41	0,0000974	12	0,862
Ηλιοτρόπιο (<i>Helianthus annuus L.</i>)	40	0,0001070	11	0,946
Castor (<i>Ricinus communis</i>)	48	0,0001307	9	0,1156
Φοινικέλαιο (<i>Elaeis guineensis</i>)	36	0,0005366	2	0,4747
Μικροφύκη (Χαμηλό Περιεχόμενο σε Έλαια)	30	0,0058700	0,2	5,1927
Μικροφύκη (Μεσαίο Περιεχόμενο σε	50	0,0097800	0,1	8,6515

Έλαια)				
Μικροφύκη (Υψηλό Περιεχόμενο σε Έλαια)	70	0,0136900	0,1	12,1104

Πίνακας III.4.6

Είδη Μικροφυκών & Τεχνικές Καλλιέργειας

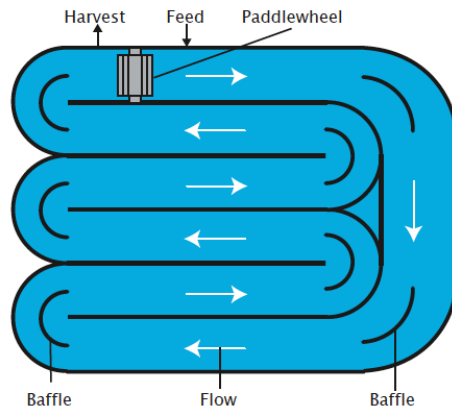
Είδος Μικροφυκών	Τεχνική Καλλιέργειας
<i>Spirulina, Arthrospira platensis / Cyanophyta</i>	Ανοικτές & Φυσικές Λίμνες
<i>Chlorella vulgaris / Chlorophyta</i>	Ανοικτές λίμνες, PBR
<i>Dunaliella salina / Chlorophyta</i>	Ανοικτές λίμνες, PBR
<i>Haematococcus pluvialis / Chlorophyta</i>	Ανοικτές λίμνες, PBR
<i>Porphyridium cruentum / Rhodophyta</i>	Σωληνοειδής PBR
<i>Muriellopsis sp. / Chlorophyta</i>	Ανοικτές λίμνες, PBR

Πίνακας III.4.7 [62]

5. Αντιδραστήρες Ανάπτυξης Καλλιέργειας Μικροφυκών

i. Ανοικτά Συστήματα (Open Ponds - Raceways)





Εικόνες III.5.1-III.5.4

Τα ανοικτά συστήματα (ανοικτές λίμνες – open ponds) αποτελούν τα παλαιότερα και απλούστερα συστήματα για μαζική καλλιέργεια μικροφυκών. Σε αυτά τα ρηχά συστήματα, το βάθος συνήθως δεν ξεπερνά τα 30 cm. Οι συνθήκες ανάπτυξης των φυκών στο σύστημα αυτό ταυτίζονται με τις φυσικές συνθήκες στις οποίες αυτά αναπτύσσονται. Όπως φαίνεται και στην παραπάνω εικόνα, οι λίμνες έχουν το σχήμα πίστας αγώνων ταχύτητας (raceway), κατά μήκος της οποίας κινείται ένα τροχήλατο μηχάνημα (raddlewheel). Με την κίνηση των τροχών αναμιγνύεται το θρεπτικό υλικό με τα μικροφύκη, βοηθώντας στην ανάπτυξη τους. Το υλικό που χρησιμοποιείται για την κατασκευή του συστήματος αυτού είναι, συνήθως, χυτό τσιμέντο (poured concrete). Μία εναλλακτική κατασκευή, όταν δεν είναι επιθυμητή η χρήση τσιμέντου, ακολουθεί τα εξής στάδια: γίνεται εκσκαφή του εδάφους κι έπειτα η περιοχή επικαλύπτεται με πλαστικό για να αποφευχθεί η απορρόφηση του νερού από το έδαφος. Επίσης, γίνεται χρήση διαφραγμάτων τα οποία καθοδηγούν το υγρό κατά τη ροή του στις γωνίες, ώστε να ελαχιστοποιηθεί ο απαιτούμενος χώρος για τη ροή του υγρού (για πιο γρήγορη ροή). [63]

Το σύστημα, στην πλειοψηφία των περιπτώσεων, βρίσκεται σε συνεχόμενη λειτουργία. Η τροφοδοσία, η οποία περιέχει θρεπτικά συστατικά όπως άζωτο, φωσφόρος και ανόργανα άλατα, εισέρχεται μπροστά από το τροχήλατο μηχάνημα. Το τελευταίο με τη λειτουργία του βοηθά στη συλλογή ενός ζωμού από φύκη. Ανάλογα με το είδος των θρεπτικών συστατικών που απαιτούνται για την ανάπτυξη της εκάστοτε καλλιέργειας, διάφορες πηγές λυμάτων, όπως απόβλητα γαλακτοβιομηχανιών, χοιροτροφείων καθώς και απόβλητα του δήμου, μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην καλλιέργεια φυκών. Στην περίπτωση, ορισμένων θαλάσσιων ειδών (marine-type) μικροφυκών, μπορεί να χρησιμοποιηθεί θαλάσσιο νερό ή νερό με υψηλή συγκέντρωση σε άλατα (αλατότητα). [63]

Παρότι, τα κόστη εγκατάστασης και λειτουργίας των ανοικτών λιμνών είναι χαμηλότερα συγκριτικά με αυτά των φωτοβιοαντιδραστήρων (PBRs), οι οποίοι θα αναλυθούν στη συνέχεια, οι πρώτες έχουν ορισμένα εγγενή μειονεκτήματα. Για παράδειγμα, επειδή είναι ανοικτές στον αέρα, συχνά υπάρχει απώλεια νερού λόγω εξάτμισης, οπότε δεν γίνεται αποδοτική χρήση του διαθέσιμου CO₂ από τα μικροφύκη και η παραγωγή βιομάζας είναι περιορισμένη. Η τελευταία επηρεάζεται σημαντικά και από τη μόλυνση της καλλιέργειας από διαφορετικών ειδών μικροφύκη, καθώς και από τους θρεπτικούς οργανισμούς των μικροφυκών. Επίσης, οι ιδανικές συνθήκες καλλιέργειας είναι δύσκολο να διατηρηθούν σε ανοικτά συστήματα και η δυσκολία ανάκτησης της βιομάζας αυξάνει σημαντικά το κόστος σε τόσο αραιωμένα συστήματα. [63]

ii. Παράκτια Συστήματα

Τα παράκτια συστήματα αποτελούν μία υποκατηγορία των ανοικτών συστημάτων. Πιο συγκεκριμένα, παράκτια είναι τα ανοικτά συστήματα που βρίσκονται κοντά σε μία περιοχή όπου υπάρχει αφθονία νερού, όπως θάλασσα, ποταμός ή λίμνη. Το μεγάλο πλεονέκτημα της χρήσης των συστημάτων αυτών είναι η εύκολη πρόσβαση στο νερό που απαιτείται από τις διάφορες διεργασίες της παραγωγικής διαδικασίας, οπότε και την εξάλειψη του κόστους μεταφοράς του τελευταίου στη μονάδα, κάτι το οποίο συνεπάγεται τη μείωση του συνολικού λειτουργικού κόστους αυτής. [64]

iii. Κλειστά Συστήματα (Φωτοβιοαντιδραστήρες - PBR)

Σωληνοειδείς PBR (α: με τεχνητό, β: με φυσικό φωτισμό)



Εικόνα III.5.5

Δακτυλοειδείς PBR



Εικόνα III.5.6

PBR Επίπεδων Πάνελ



Εικόνα III.5.7

Τα κλειστά συστήματα έχουν πλεονεκτήματα σε σχέση με τα ανοικτά, αλλά κοστίζουν αρκετά περισσότερο (τουλάχιστον 10 φορές υψηλότερο κόστος) από τα ανοικτά. Μερικές φορές το κόστος τους μπορεί να φτάσει έως και 7,6 εκατ. € ανά στρέμμα. [63]

Τα κλειστά συστήματα έχουν σχεδιαστεί ούτως ώστε ξεπερνούν τα προβλήματα μόλυνσης και εξάτμισης που εμφανίζονται στα ανοικτά συστήματα. Πιο αναλυτικά, τα συστήματα αυτά, έχουν κατασκευαστεί από διάφανα υλικά με σκοπό τη διείσδυση των ακτίνων του ήλιου στο εσωτερικό τους. Οι δεξαμενές όπου αναπτύσσεται η καλλιέργεια παρουσιάζουν έναν υψηλό λόγο επιφάνειας προς όγκο. Το πλέον χρησιμοποιούμενο μοντέλο αντιδραστήρα αυτής της κατηγορίας είναι σωληνοειδούς μορφής, όπως φαίνεται και στην παραπάνω εικόνα, με τους διάφανους σωλήνες να βρίσκονται ευθυγραμμισμένοι με τις ακτίνες του ήλιου. Οι σωλήνες έχουν διάμετρο μικρότερη των 10 cm ώστε να μεγιστοποιείται το ποσοστό διείσδυσης των ακτίνων του ήλιου σε αυτές. Το υγρό διακινείται μέσω αντλίας στους σωλήνες, όπου εκτίθεται στον ήλιο για να λάβει χώρα η διεργασία της φωτοσύνθεσης και μετά κατευθύνεται στη δεξαμενή αποθήκευσης (reservoir). Μέρος των μικροφυκών συλλέγεται αφού περάσει από τους ηλιακούς σωλήνες συλλογής, κάνοντας με αυτόν τον τρόπο δυνατή τη συνεχή καλλιέργεια μικροφυκών. Σε ορισμένους φωτοβιοαντιδραστήρες, οι σωλήνες τοποθετούνται σε μορφή έλικας. Αυτοί οι αντιδραστήρες καλούνται ελικο-σωληνοειδείς φωτοβιοαντιδραστήρες (helical-tubular photobioreactors). Αυτά τα συστήματα συνήθως απαιτούν τεχνητό φωτισμό ο οποίος επιβαρύνει το τελικό κόστος παραγωγής. Για αυτόν τον λόγο, τέτοιου είδους αντιδραστήρες χρησιμοποιούνται για την παραγωγή προϊόντων υψηλής προστιθέμενης αξίας, όχι για την παραγωγή της πρώτης ύλης για το βιοντίζελ, το οποίο, εν αντιθέσει με τα προηγούμενα, αποτελεί προϊόν χαμηλής προστιθέμενης αξίας. Επίσης, χρησιμοποιείται αντλία για την επικράτηση τυρβώδους ροής στον αντιδραστήρα, η οποία εμποδίζει την επικάλυψη της βιομάζας των φυκών. [63]

Η διεργασία της φωτοσύνθεσης παράγει οξυγόνο, το οποίο δεν αποτελεί πρόβλημα στα ανοικτά συστήματα, διότι επιστρέφει στην ατμόσφαιρα. Στα κλειστά συστήματα, τα επίπεδα οξυγόνου αυξάνονται μέχρι να αναστείλουν τη δράση των μικροφυκών και να τα

δηλητηριάσουν. Για αυτόν τον λόγο, τα μικροφύκη πρέπει να επιστρέφουν σε μία ζώνη απαερίωσης (degassing), όπου φυσαλίδες αέρα διαπερνούν το υγρό μίγμα ώστε να απομακρυνθεί το οξυγόνο από το σύστημα. [63]

Επίσης, τα φύκη χρησιμοποιούν CO₂, το οποίο μπορεί να προκαλέσει πενία (starvation) άνθρακα και αύξηση pH. Επομένως, για την καλλιέργεια των μικροφυκών σε μεγάλη κλίμακα, απαιτείται συνεχής τροφοδότηση του συστήματος με CO₂. Στους φωτοβιοαντιδραστήρες πρέπει να ρυθμίζεται η θερμοκρασία για να αναπτυχθεί η καλλιέργεια. Αυτό γίνεται με ψύξη κατά τις πρωινές ώρες, ενώ η ρύθμιση συνεχίζεται και κατά τη διάρκεια της νύχτας. Η ρύθμιση της θερμοκρασίας επιτυγχάνεται με τη χρήση εναλλακτών θερμότητας στις σωληνώσεις του αντιδραστήρα ή στη στήλη απαερίωσης.

Στην περίπτωση χρήσης φωτοβιοαντιδραστήρα επίπεδων πάνελ, η μέγιστη παραγωγή βιομάζας επιτυγχάνεται όταν τα πάνελ είναι προσανατολισμένα στη Δύση ή στην Ανατολή και η παραγωγικότητα σχετίζεται με τη διάρκεια της ημέρας. Στόχος της κατασκευής και της τοποθέτησης ενός φωτοβιοαντιδραστήρα αυτού του τύπου δεν είναι η επίτευξη της μέγιστης δυνατής παραγωγικότητας κατ' όγκο, αλλά η αποδοτική χρήση της ενέργειας του φωτός και η μείωση της διάρκειας του σκοτεινού σταδίου και της κυτταρικής αναπνοής, ώστε η συνολική παραγωγικότητα να βρίσκεται σε υψηλά επίπεδα. Επίσης, η σκίαση και η διάθλαση του φωτός μεταξύ των παράλληλων πάνελ επηρεάζει σημαντικά την παραγωγικότητα. Πιο συγκεκριμένα, η βέλτιστη απόσταση μεταξύ των πάνελ είναι 0.2 m με 0.4 m, ενώ η παραγωγικότητα μειώνεται σε κοντινότερη απόσταση των πάνελ. [47]

Στην περίπτωση χρήσης φωτοβιοαντιδραστήρα στήλης φυσαλίδων (bubble column photobioreactor), η διάμετρος του φωτοβιοαντιδραστήρα συνδέεται με το ρυθμό παραγωγής της βιομάζας του μικροφύκου, σε θεωρητικό επίπεδο, μέσω του μαθηματικού τύπου: $M = 2.2 \cdot D^{-0.8}$, όπου το M αντιπροσωπεύει τον ρυθμό ανάπτυξης σε g/L/h και το D τη διάμετρο του PBR σε mm. Παρόλα αυτά, παρουσιάζεται μικρή απόκλιση των πειραματικών αποτελεσμάτων από τους θεωρητικούς υπολογισμούς. Αύξηση της διαμέτρου του PBR οδηγεί σε μείωση της συγκέντρωσης των κυττάρων στην ίδια περίοδο καλλιέργειας υπό τον ίδιο φωτισμό. Σε αυτό το σημείο πρέπει να ληφθεί υπόψη το γεγονός ότι το κόστος της συλλογής των μικροφυκών από το μέσο είναι αντιστρόφως ανάλογο της πυκνότητας των μικροφυκών σε αυτό. Από την άλλη πλευρά, η παραγωγικότητα ανά μονάδα επιφάνειας αυξάνει με την αύξηση της διαμέτρου του PBR, οπότε πρέπει να βρεθεί μία διάμετρος βέλτιστης λειτουργίας, η οποία θα παρουσιάζει την καλύτερη δυνατή ισορροπία ανάμεσα σε παραγωγικότητα και κόστος. [65]

Το κυριότερο πλεονέκτημα χρήσης κλειστών φωτοβιοαντιδραστήρων είναι η αποφυγή μόλυνσης της καλλιέργειας και εξάτμισης του νερού, τα οποία αποτελούν προβλήματα των ανοικτών συστημάτων. Επιπρόσθετα, η παραγωγή στα κλειστά συστήματα είναι κατά μέσο όρο 13 φορές μεγαλύτερη αυτής των ανοικτών. Επίσης, η συλλογή των μικροφυκών είναι πιο εύκολη και χαμηλότερου κόστους σε σχέση με τα ανοικτά συστήματα, λόγω της μεγάλης αραιώσης που υπάρχει στα τελευταία. Η συγκέντρωση των μικροφυκών στα κλειστά συστήματα είναι κατά προσέγγιση 30 φορές μεγαλύτερη αυτής των ανοικτών. [63]

Παρόλα αυτά, οι κλειστοί φωτοβιοαντιδραστήρες (PBRs) παρουσιάζουν και ορισμένα μειονεκτήματα. Πρώτον, καθίσταται δύσκολη η μεταφορά των αντιδραστήρων αυτών σε μεγάλη κλίμακα (scale up). Επίσης, ο περιορισμός του φωτισμού δεν είναι δυνατό να αντιμετωπιστεί τελείως, επειδή το ποσοστό διείσδυσης του φωτός είναι αντιστρόφως

ανάλογο της συγκέντρωσης των κυττάρων. Επιπρόσθετα, η επικάλυψη των κυττάρων στα τοιχώματα των σωλήνων του αντιδραστήρα μπορεί να περιορίσει ακόμη περισσότερο τη διείσδυση του φωτός. Τέλος, μολονότι, στα κλειστά συστήματα η συγκέντρωση της βιομάζας βρίσκεται αυξημένη σε σύγκριση με τα ανοικτά, η ανάπτυξη των μικροφυκών δεν είναι η βέλτιστη λόγω συχνών μεταβολών της θερμοκρασίας και της έντασης του φωτός. [63]

iv. Σύγκριση Ανοικτής Λίμνης - Φωτοβιοαντιδραστήρα

Στη συνέχεια πραγματοποιείται σύγκριση της ανοιχτής λίμνης και του φωτοβιοαντιδραστήρα (PBR). Η σύγκριση αυτή παρουσιάζεται σε μορφή πίνακα για άμεση κατανόηση των πλεονεκτημάτων, των μειονεκτημάτων και των γενικότερων διαφορών των δύο τύπων αντιδραστήρων που χρησιμοποιούνται για την καλλιέργεια των μικροφυκών.

Συγκριτικός Πίνακας Ανοικτής Λίμνης - Φωτοβιοαντιδραστήρα

Παράγοντας	Ανοικτό Σύστημα (Λίμνη)	Κλειστό Σύστημα (PBR)
Απαιτούμενος Χώρος	Μεγάλος	Μικρός
Εξάτμιση	Έντονη	Καθόλου
Απώλεια Νερού	Πολύ Μεγάλη	Μικρή
Χρήση Νερού	Υψηλή (λόγω Εξάτμισης)	Χαμηλότερη
Απώλεια CO ₂	Μεγάλη	Μικρή
Θερμοκρασία	Μεγάλες Διακυμάνσεις	Απαίτηση Ψύξης
Εξάρτηση από Καιρικές Συνθήκες	Έντονη	Ασθενής
Έλεγχος Διεργασίας	Δύσκολος	Εύκολος
Διάτμηση	Ασθενής	Έντονη
Καθαρισμός	Καθόλου	Απαιτούμενος
Μόλυνση	Υψηλή	Καθόλου
Ευελιξία Επιλογής Στελέχους Μικροφύκους	Χαμηλή (Ανοικτό σε παράσιτα)	Υψηλή
Είδος Μικροφυκών	Πολύ Περιορισμένο	Ευέλικτο
Ποιότητα Βιομάζας	Μεταβλητή	Αναπαραγωγίσιμη
Πυκνότητα Πληθυσμού	Χαμηλή	Υψηλή
Απόδοση Συλλογής	Χαμηλή	Υψηλή
Κόστος Συλλογής	Μεγάλο	Μικρότερο
Απόδοση Χρήσης Φωτισμού	Χαμηλή	Υψηλή
Παράμετρος με το Μεγαλύτερο Κόστος	Ανάμιξη	Έλεγχος Οξυγόνου και Θερμοκρασίας
Απαιτήσεις σε Ενέργεια (W)	4000	1800
Αρχικό Κεφάλαιο	Χαμηλό	Υψηλό

Ευκολία μετατροπής σε βιομηχανική κλίμακα	Ικανοποιητική	Μεταβλητή (ανάλογα με τον τύπο του PBR)
Διαθεσιμότητα Τεχνολογίας	Έτοιμη	Μη δοκιμασμένη σε βιομηχανική κλίμακα
Κόστος Διεργασίας κατά τη ροή	Υψηλό (Πολύ Διεσπαρμένος Πληθυσμός)	Χαμηλό (Υψηλή Πυκνότητα Πληθυσμού)

Πίνακας III.5.1 [66][67][68][69][70]

6. Τρόποι Συλλογής Μικροφυκών από την Καλλιέργεια

i. Εισαγωγή

Η μέθοδος συλλογής, η οποία επιλέγεται για μία καλλιέργεια, εξαρτάται από το είδος των μικροφυκών και διαφέρει από είδος σε είδος. Οι πλέον συνήθεις μέθοδοι συλλογής είναι μέσω επικάθισης λόγω βαρύτητας ή φυγοκέντρισης. Τα έλαια διαχωρίζονται από τη βιόμαζα με χρήση διαλύματος κι έπειτα επεξεργάζονται ώστε να παραχθεί βιοντίζελ από αυτά. [63] [69]

Βασικό κριτήριο για την επιλογή της κατάλληλης μεθόδου συλλογής αποτελεί η επιθυμητή ποιότητα του τελικού προϊόντος. Στην περίπτωση που το επιθυμητό τελικό προϊόν έχει χαμηλή προστιθέμενη αξία, όπως για παράδειγμα το βιοντίζελ, μπορεί να χρησιμοποιηθεί βαρυτική καθίζηση, σε συνδυασμό με κροκίδωση για καλύτερο αποτέλεσμα, ώστε να γίνει η συλλογή. Επίσης, είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν δεξαμενές καθίζησης ή λίμνες κατακάθισης (settling ponds) σε ορισμένες περιπτώσεις, όπως για παράδειγμα η ανάκτηση βιόμαζας από διεργασίες αστικών αποβλήτων. Όσον αφορά στα προϊόντα υψηλής προστιθέμενης αξίας, η ανάκτηση μικροφυκών υψηλής ποιότητας τα οποία προορίζονται για χρήση ως τροφή ή σε εφαρμογές υδατικών καλλιεργειών (aquaculture), συνιστάται η χρήση φυγόκεντρων συνεχούς λειτουργίας, οι οποίες μπορούν να επεξεργαστούν μεγάλες ποσότητες βιόμαζας. Μολονότι αυξάνουν το κόστος παραγωγής σημαντικά, οι φυγόκεντροι είναι κατάλληλοι για τον ταχύ διαχωρισμό οποιουδήποτε τύπου μικροοργανισμού, ο οποίος συγκρατείται σε αυτές κατά τη διαδικασία της ανάκτησης. Επιπλέον, οι φυγόκεντροι μπορούν να πλυθούν και να αποστειρωθούν σχετικά εύκολα ώστε να αποφευχθεί η μόλυνση ή η ρύπανση του τελικού ακατέργαστου προϊόντος από βακτήρια. [2]

Άλλο ένα βασικό κριτήριο για την επιλογή της κατάλληλης μεθόδου για τη συλλογή των μικροφυκών είναι η δυνατότητα που αυτή προσφέρει για τη ρύθμιση της πυκνότητας ή του αποδεκτού επιπέδου υγρασίας του τελικού συμπυκνώματος στη βέλτιστη τιμή, ή περιοχή τιμών, για την αξιοποίηση του στα επόμενα στάδια της παραγωγικής διαδικασίας, καθώς και η αποτελεσματικότητα της ρύθμισης αυτής στις επιθυμητές τιμές. Η βαρυτικά καθιζάμενη λάσπη είναι περισσότερο αραιωμένη από τη βιόμαζα η οποία ανακτάται μέσω της φυγοκέντρισης, γεγονός το οποίο επηρεάζει σημαντικά το κόστος του ανακτώμενου προϊόντος. Επειδή, το κόστος της θερμικής ξήρανσης είναι αρκετά υψηλότερο εκείνου της μηχανικής αφυδάτωσης, για τη μείωση του συνολικού κόστους παραγωγής απαιτείται συμπύκνωμα με υψηλό περιεχόμενο σε στερεά μετά τη συλλογή ώστε να διευκολυνθεί η αφυδάτωση της βιόμαζας. Στην περίπτωση αυτή, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένας συνδυασμός μεθόδων, λόγου χάρη μια προσυγκέντρωση με ένα στάδιο μηχανικής αφυδάτωσης, όπως για παράδειγμα ένα μικροστραγγηστήρι (microstrainer), ένα φίλτρο ή μία φυγοκέντριση κι έπειτα μία μετασυγκέντρωση μέσω μιας απλής κοχλιωτής φυγόκεντρου (screw centrifuge) ή μιας θερμικής ξήρανσης. Μετά το διαχωρισμό από το μέσο της καλλιέργειας, η βιόμαζα των μικροφυκών, η οποία βρίσκεται σε περιεκτικότητα 5-15% κατά ξηρό βάρος σε αυτό, πρέπει να επεξεργαστεί ταχέως για να μη φθαρεί κατά την έκθεση της σε πολύ ζεστό κλίμα για λίγες ώρες. [2]

Τέλος, το στάδιο αυτό έχει πολύ υψηλό συντελεστή κόστους στην παραγωγική διαδικασία. Πιο συγκεκριμένα, οι περισσότερες αναλύσεις καλλιέργειας των μικροφυκών προς παραγωγή προϊόντων, όπως για παράδειγμα το βιοντίζελ, αναφέρουν ότι το στάδιο της συλλογής των μικροφυκών αποτελεί το 20-30% του συνολικού κόστους παραγωγής. Αυτό οφείλεται κυρίως σε δύο λόγους: το πολύ μικρό μέγεθος των κυττάρων, των οποίων η διάμετρος είναι 3-30 μm, ανάλογα με το είδος, και δεύτερον από την πολύ χαμηλή συγκέντρωση των μικροφυκών στην καλλιέργεια, συνήθεις τιμές της οποίας είναι 0.5-5 kg (ξηρό βάρος βιόμαζας) ανά m³ μέσου καλλιέργειας (νερό) ή σε ποσοστό: 0.05-0.5 %. [2] [71] [72] [73] [56]

Στη συνέχεια παρουσιάζονται αναλυτικά στοιχεία για καθεμία από τις διαθέσιμες μεθόδους συλλογής των μικροφυκών από την καλλιέργεια με έμφαση στα πλεονεκτήματα, τα μειονεκτήματα, το κόστος και τη βιωσιμότητα σε κάθε περίπτωση, για την λειτουργία της μονάδας σε βιομηχανική κλίμακα.

ii. Μαζική συλλογή (Bulk Harvesting)

Σκοπός αυτής της μεθόδου συλλογής είναι ο διαχωρισμός της βιόμαζας από το υγρό αιώρημα. Με αυτήν τη μέθοδο τα στερεά μπορούν να φτάσουν από 2 έως 7% χρησιμοποιώντας κροκίδωση, επίπλευση ή βαρυτική καθίζηση. [34]

iii. Πάχυνση (Thickening)

Σε αυτή τη μέθοδο συγκεντρώνεται ο πολτός με φιλτράρισμα και φυγοκέντριση. Σε αυτήν την περίπτωση απαιτείται περισσότερη ενέργεια από εκείνη για τη μαζική συλλογή. [34]

iv. Φυγοκέντριση (Centrifugation)

Η φυγοκέντριση αποτελεί μία από τις κυριότερες μεθόδους συλλογής μικροφυκών και ουσιαστικά αποτελεί μία τεχνική καθίζησης των μικροφυκών με αυξημένη ταχύτητα συγκριτικά με τις υπόλοιπες τεχνικές αυτής της κατηγορίας. Η φυγοκέντριση μπορεί να λάβει χώρα σε συστήματα είτε με περιστρεφόμενα τοιχώματα είτε με σταθερά τοιχώματα, στη δεύτερη περίπτωση, σε συστήματα όπως οι υδροκυκλώνες. Οι τελευταίοι, όμως, δεν παρουσιάζουν τις επιθυμητές αποδόσεις κατά τον διαχωρισμό των μικροφυκών από το μίγμα. [34] [71]

Εργαστηριακές μελέτες οι οποίες εκπονήθηκαν σε λύματα λίμνης (pond effluent) στα 500-1000xg έδειξαν ότι το 80-90% των μικροφυκών μπορεί να ανακτηθεί σε 2-5 λεπτά. Σε βιομηχανική κλίμακα, ωστόσο, απαιτούνται 13000xg για συλλογή των μικροφυκών με απόδοση υψηλότερη από 95 %. Στα 6000xg η απόδοση ήταν 60 %, ενώ στα 1300xg ήταν 40 %. [71] [73]

Η φυγοκέντριση αποτελεί την πλέον επιθυμητή μέθοδο συλλογής της βιόμαζας των μικροφυκών από το μίγμα, ειδικά όταν στόχος είναι η παραγωγή εκτεταμένων αυτόβιων συμπυκνωμάτων για υδάτινες καλλιέργειες (extended shelf (ράφι) -life concentrates for aquaculture). Όμως, η έκθεση των κυττάρων των μικροφυκών σε αυξημένες βαρυτικές και διατμητικές δυνάμεις μπορεί να καταστρέψει την κυτταρική δομή. Αυτό εξαρτάται κυρίως από το είδος των μικροφυκών που συλλέγονται και από τον τρόπο με τον οποίο πραγματοποιείται η φυγοκέντριση. Τέλος, η εφαρμογή φυγοκέντρισης σε μεγάλες καλλιέργειες απαιτεί αυξημένο κόστος και χρόνο. [34] [71]

v. Κροκίδωση (Flocculation)

Η κροκίδωση είναι μία διεργασία κατά την οποία διεσπαρμένα σωματίδια συγκεντρώνονται μαζί ώστε να σχηματίσουν μεγάλα σωματίδια, τα οποία στη συνέχεια καθιζάνουν. Οι υποκατηγορίες της κροκίδωσης αποτελούνται από την αυτοκροκίδωση, την χημική πήξη με οργανικά, ανόργανα και βιολογικά κροκιδωτικά, την συνδυασμένη κροκίδωση και την ηλεκτρολυτική διεργασία.

a. Αυτοκροκίδωση (Autoflocculation)

Το φαινόμενο της αυτοκροκίδωσης λαμβάνει χώρα ως το αποτέλεσμα της κατακρήμνισης των ανθρακικών αλάτων με τα κύτταρα των φυκών σε συνθήκες αυξημένου pH. Το προηγούμενο αποτελεί συνέπεια της κατανάλωσης CO₂ κατά τη διαδικασία της φωτοσύνθεσης. Οπότε, η παρατεταμένη καλλιέργεια υπό το φως του ήλιου σε συνθήκες περιορισμένου CO₂ βοηθά την αυτοκροκίδωση των μικρών σε μέγεθος κυττάρων των φυκών, τα οποία μπορούν έπειτα να συλληθούν. Εργαστηριακές μελέτες έδειξαν ότι το φαινόμενο της αυτοκροκίδωσης μπορεί να προσομοιωθεί με προσθήκη NaOH ώστε να επιτευχθεί η επιθυμητή τιμή για το pH, ώστε να λάβει χώρα αυτοκροκίδωση. [34] [56]

b. Χημική Κροκίδωση (Chemical Flocculation)

Η προσθήκη χημικών ουσιών σε μία καλλιέργεια μικροφυκών για να επαχθεί κροκίδωση αποτελεί μία κοινή πρακτική σε έναν μεγάλο αριθμό περιπτώσεων διαχωρισμού στερεού-υγρού ως ένα στάδιο προκατεργασίας, το οποίο εφαρμόζεται στην κατεργασία μεγάλων ποσοτήτων πολλών ειδών μικροφυκών. Υπάρχουν δύο κύριες κατηγορίες κροκιδωτικών βάσει της χημικής τους σύστασης: τα ανόργανα και τα οργανικά/πολυηλεκτρολυτικά κροκιδωτικά. [34]

▪ Ανόργανα Κροκιδωτικά (Inorganic Flocculants)

Τα κύτταρα των μικροφυκών είναι αρνητικά φορτισμένα ως αποτέλεσμα της προσρόφησης των ιόντων τα οποία προέρχονται από την οργανική ύλη και της διάστασης ή του ιονισμού των επιφανειακά λειτουργικών (ενεργών) ομάδων. Με τη διατάραξη της

σταθερότητας του συστήματος μπορεί να επιτευχθεί επιτυχής συλλογή των μικροφυκών από την καλλιέργεια. Η προσθήκη ενός πηκτικού, όπως για παράδειγμα εκείνα τα οποία έχουν ως βάση τον σίδηρο ή το αλουμίνιο, μπορεί να εξουδετερώσει ή τουλάχιστον να μειώσει την επιφανειακή φόρτιση. Στην περίπτωση της συλλογής των ειδών *Scenedesmus* και *Chlorella* από τις αντίστοιχες καλλιέργειες, χρησιμοποιήθηκε $Al_2(SO_4)_3$ (alum) και η συλλογή επιτεύχθηκε μέσω εξουδετέρωσης της επιφανειακής φόρτισης. Τα μικροφύκη μπορούν να κροκιδωθούν από ανόργανα κροκιδωτικά όταν το pH βρίσκεται σε αρκετά χαμηλές τιμές.

Παρόλα αυτά, τα ανόργανα πηκτικά έχουν και ορισμένα μειονεκτήματα κατά τη χρήση τους. Πρώτον, απαιτούνται υψηλές συγκεντρώσεις ανόργανων κροκιδωτικών ώστε να επιτευχθεί επιτυχής διαχωρισμός στερεού-υγρού στην περίπτωση των μικροφυκών, γεγονός το οποίο οδηγεί στην παραγωγή μεγάλης ποσότητας λάσπης. Επίσης, η διεργασία διαχωρισμού μέσω ανόργανων κροκιδωτικών είναι αρκετά ευαίσθητη στο pH. Ακόμη, μεγάλος αριθμός πηκτικών έχει ικανοποιητική δράση με ορισμένα είδη μικροφυκών, ενώ σε ορισμένα άλλα όχι. Τέλος, το προστιθέμενο αλουμίνιο ή τα άλατα του σιδήρου μπορούν να μολύνουν το τελικό προϊόν. [34]

▪ Οργανικά Κροκιδωτικά (Organic Flocculants)

Για την επίτευξη αποτελεσματικής καθίζησης, το μέγεθος των οργανικών κροκιδωτικών πρέπει να ξεπερνά τα 100 μm. Μία λύση για τη συλλογή των μικροφυκών είναι η προσθήκη πολυμερούς-γέφυρας, το οποίο έχει υψηλό μοριακό βάρος που συνεπάγεται αύξηση του μεγέθους των κροκιδωτικών βελτιώνοντας με αυτόν τον τρόπο την καθίζηση των μικροφυκών. Άλλη μία αποτελεσματική μέθοδος για τη συλλογή των μικροφυκών είναι η κροκίδωση με τη βοήθεια του $Al_2(SO_4)_3$ ταυτόχρονα με ορισμένους ηλεκτρολύτες. Κροκιδωτικά με παρόμοια δράση αποτελούν τα: $FeCl_3$, $Fe_2(SO_4)_3$ και η αλούμινα (alum). Τα κατιονικά κροκιδωτικά αποτελούν τα πλέον αποτελεσματικά για την ανάκτηση των μικροφυκών. Δοκιμές με ανιονικούς και οι μη ιονικούς ηλεκτρολύτες έχουν δείξει ότι αμφότεροι αποτυγχάνουν στην επίτευξη κροκίδωσης των μικροφυκών, κάτι το οποίο εξηγείται είτε από την απομάκρυνση που προκαλούν τα αντίθετα φορτία των σωματιδίων είτε από το γεγονός ότι η απόσταση μεταξύ των σωματιδίων είναι ανεπαρκής ώστε να σχηματιστούν γέφυρες. Ορισμένοι παράγοντες που επηρεάζουν την αποδοτικότητα της κροκίδωσης είναι: το μοριακό βάρος του πολυμερούς, η πυκνότητα του φορτίου των μορίων, η συγκέντρωση της βιόμαζας των μικροφυκών, το σθένος των ιονικών δεσμών που υπάρχουν στο μίγμα και το pH του μίγματος, καθώς και η έκταση της ανάμιξης του ρευστού. Επίσης, η κροκίδωση η οποία λαμβάνει χώρα χρησιμοποιώντας κατιονικά πολυμερή μπορεί να ανασταλεί από την υψηλή αλατότητα του θαλάσσιου περιβάλλοντος. Οι πολυηλεκτρολύτες υψηλού μοριακού βάρους αποτελούν πολύ καλούς παράγοντες γεφύρωσης. Ακόμη, η ύπαρξη βιόμαζας στο μίγμα σε υψηλή συγκέντρωση βοηθά την κροκίδωση λόγω των συχνών «συναντήσεων» μεταξύ των κυττάρων. Η χαμηλού επιπέδου ανάμιξη του αντιδραστήρα μπορεί να φανεί χρήσιμη διότι φέρνει πιο κοντά τα κύτταρα μεταξύ τους, αλλά υπάρχει κίνδυνος διάσπασης των κροκιδωτικών σε περίπτωση ανάπτυξης πολύ μεγάλων διατμητικών δυνάμεων. Τέλος, οι λειτουργικές (δραστικές) ομάδες των τοιχωμάτων των κυττάρων των μικροφυκών, έχουν σημαντικό ρόλο στη

διαδικασία της συλλογής, αφού παρακινούν τον σχηματισμό αρνητικά φορτισμένων κέντρων στην επιφάνεια των αντίστοιχων κυττάρων. [34] [71]

c. Βιολογικά Κροκιδωτικά (Bio-Flocculants)

Τα βιολογικά κροκιδωτικά παράγονται από φυσικές πηγές και είναι βιοδιασπώμενα, επομένως δεν μολύνεται η βιόμαζα των μικροφυκών με τη χρήση κροκιδωτικών αυτού του είδους. Χαρακτηριστικό παράδειγμα βιολογικού κροκιδωτικού αποτελεί η χιτοσίνη (chitosan). Πειραματικές μελέτες έδειξαν ότι το εν λόγω κροκιδωτικό είναι αποδοτικό στη συλλογή πολλών ειδών μικροφυκών και η απόδοση του επηρεάζεται από το pH και τη συγκέντρωση του στην καλλιέργεια. Η μέγιστη δυνατή απόδοση επιτυγχάνεται για τιμές pH κοντά στο 7. Η κροκίδωση λαμβάνει χώρα με εξουδετέρωση και ένωση/γεφύρωση (bridging) των κυττάρων των μικροφυκών από τις αλυσίδες της χιτοσίνης. Η ουσία αυτή αποτελεί έναν ασφαλή βιομηχανικό τρόπο συλλογής των μικροφυκών αφού εφαρμόζεται ήδη στις βιομηχανίες των τροφίμων και των φαρμάκων. Επίσης, τα συγκεντρωμένα μικροφύκη δεν υπόκεινται σε αλλοίωση της δομής τους, γεγονός το οποίο αποτελεί πλεονέκτημα στη χρήση της μεθόδου για την παραγωγή προϊόντων υψηλής προστιθέμενης αξίας από τα μικροφύκη, έναντι ανταγωνιστικών μεθόδων συλλογής όπως η φυγοκέντριση κατά την οποία τα κύτταρα σπάζουν με αποτέλεσμα την μεταβίβαση των θρεπτικών συστατικών στο μέσο της καλλιέργειας, το οποίο είναι ανεπιθύμητο σε αυτό το στάδιο της παραγωγικής διαδικασίας. Το κόστος παραγωγής της χιτοσίνης είναι μικρότερο των 2 USD/kg (τιμή για το έτος 2001), ενώ 1 kg χιτοσίνης είναι αρκετό για την συλλογή μικροφυκών από καλλιέργεια με νερό 50-500 m³ ανάλογα με τη συγκέντρωση των μικροφυκών σε αυτό. Άλλες περιπτώσεις βιολογικών κροκιδωτικών αποτελούν το κατιονικό άμυλο (cationic starch), το οποίο προκύπτει από τη χημική επεξεργασία αυτού του πολυσακχαρίτη και τα EPS (Extracellular Polymeric Substances - EPS). [34] [71] [56] [74] [75]

d. Συνδυασμένη Κροκίδωση (Combined Flocculation)

Η συνδυασμένη κροκίδωση αποτελεί μία πολυσταδιακή διεργασία κροκίδωσης η οποία χρησιμοποιεί αρκετά διαφορετικά είδη κροκιδωτικών. Για παράδειγμα, για να επιτευχθεί κροκίδωση σε μία καλλιέργεια θαλάσσιων μικροφυκών σε θαλάσσιο νερό υπάρχουν δύο ενδεδειγμένες μέθοδοι. Η πρώτη χρησιμοποιεί πολυηλεκτρολύτες μαζί με ανόργανα πηκτικά όπως χλωριούχο σίδηρο (FeCl₃) ή Al₂(SO₄)₃ (alum) και η δεύτερη οξείδωση με όζον (ozone oxidation) ακολουθούμενη από προσθήκη κροκιδωτικού. Επίσης, είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί κατιονικό άμυλο (φορτίου δ⁺) ως κροκιδωτικό σε αμφότερες τις καλλιέργειες μικροφυκών γλυκού και θαλάσσιου νερού. [34]

vi. Ηλεκτρολυτική Διεργασία (Electrolytic Process)

Οι μηχανισμοί διαχωρισμού και συλλογής οι οποίοι ανήκουν στην κατηγορία της ηλεκτρολυτικής πήξης ακολουθούν τρία διαδοχικά στάδια. Στο πρώτο στάδιο, παράγονται ουσίες που δρουν ως πηκτικά μέσω της ηλεκτρολυτικής οξειδωσης ενός ηλεκτροδίου. Έπειτα, στο δεύτερο στάδιο, λαμβάνει χώρα αποσταθεροποίηση του αιωρήματος των σωματιδίων και ταυτόχρονα καταστρέφεται το γαλάκτωμα. Στο τρίτο στάδιο, συναθροίζονται οι αποσταθεροποιημένες φάσεις προς σχηματισμό συσσωματωμάτων. Μελέτες για την απομάκρυνση των μικροφυκών από βιομηχανικά λύματα με χρήση ηλεκτρολυτικής πήξης (electrocoagulation) συνεχούς ροής έδειξαν ότι η ηλεκτρολυτική κροκίδωση δεν απαιτεί τη χρήση ηλεκτροδίου το οποίο τελικά καταναλώνεται πλήρως, όπως συμβαίνει στη περίπτωση της ηλεκτρολυτικής πήξης. Η λειτουργία της ηλεκτρολυτικής κροκίδωσης βασίζεται στη μεταφορά των μικροφυκών στην άνοδο ώστε να εξουδετερώσουν το φορτίο τους κι έπειτα να σχηματίσουν συσσωματώματα. Τέλος, η απόδοση της ηλεκτρολυτικής κροκίδωσης για την απομάκρυνση των μικροφυκών κυμαίνεται 80-95%, το οποίο είναι πολύ ικανοποιητικό ποσοστό, ειδικότερα στην περίπτωση της παραγωγής ενός προϊόντος χαμηλής προστιθέμενης αξίας όπως το βιοντίζελ, όπου το ποσοστό του διαχωρισμού δεν είναι αναγκαίο να προσεγγίζει το 100%. [34]

vii. Βαρυτική καθίζηση (Gravity Sedimentation)

Η βαρυτική καθίζηση αποτελεί μία συνήθη μέθοδο η οποία εφαρμόζεται στον διαχωρισμό των μικροφυκών από το νερό των αστικών λυμάτων και τη μετέπειτα συλλογή τους. Η πυκνότητα και η διάμετρος των κυττάρων των μικροφυκών καθώς και η επαγόμενη ταχύτητα καθίζησης επηρεάζουν την καθίζηση των αιωρούμενων στερεών στο μίγμα. Η χρήση διαχωριστήρων με ελάσματα (lamella) και δεξαμενών καθίζησης βελτιώνουν την απόδοση της συλλογής μικροφυκών με τη μέθοδο της καθίζησης. Άλλος ένας παράγοντας που βελτιώνει την απόδοση του διαχωρισμού, οπότε και της συλλογής μικροφυκών, είναι η κροκίδωση. Η αποτελεσματικότητα της μεθόδου απομάκρυνσης στερεών με τη βοήθεια της βαρύτητας εξαρτάται σημαντικά από την πυκνότητα των σωματιδίων των μικροφυκών. Η μέθοδος αυτή δεν είναι αποτελεσματική για σωματίδια χαμηλής πυκνότητας, τα οποία δεν καθιζάνουν εύκολα και στο σύνολο τους. Επίσης, υπάρχει κίνδυνος υποβάθμισης της ποιότητας της βιομάζας κατά τη διάρκεια της καθίζησης, κάτι το οποίο οφείλεται στις υψηλές θερμοκρασίες. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται κυρίως στη συλλογή του μικροφύκου *Spirulina* από την αντίστοιχη καλλιέργεια. Η βαρυτική καθίζηση αποτελεί μία από τις πιο αργές μεθόδους συλλογής (0.1-2.6 cm/h), ενώ οι συγκεντρώσεις των στερεών μετά την εφαρμογή αυτής της μεθόδου είναι 1.5 %. Στα πλεονεκτήματα της μεθόδου περιλαμβάνονται το χαμηλό κόστος, η απουσία εξωτερικής μόλυνσης, όπως στην περίπτωση χρήσης χημικών κροκιδωτικών και η δυνατότητα ανακύκλωσης νερού πλούσιου σε θρεπτικά συστατικά. [34] [73] [56]

Η Βαρυτική καθίζηση περιγράφεται από τον νόμο του Stokes. Πιο συγκεκριμένα, η εξίσωση από την οποία μπορεί να υπολογιστεί η ταχύτητα της καθίζησης είναι η εξής:

$$\text{Ταχύτητα Καθίζησης} = \frac{2}{9} \cdot g \cdot \frac{r^2}{\eta} \cdot (\rho_s - \rho_L)$$

όπου r είναι η ακτίνα των κυττάρων, η το δυναμικό ιξώδες του ρευστού, ρ_s και ρ_l οι πυκνότητες του στερεού (κύτταρα) και του υγρού (μέσο καλλιέργειας) αντίστοιχα. Η διαφορά των δύο πυκνοτήτων είναι πολύ μικρή, οπότε δεν αποτελεί ισχυρό συντελεστή της ταχύτητας καθίζησης. Η τελευταία για την περίπτωση σφαιρικών κυττάρων, όπως του είδους *Chlorella* ($\rho_s = 1070 \text{ kg/m}^3$, $r_{\text{average}} = 2,5 \mu\text{m}$) στο γλυκό νερό, ($\rho_l = 998 \text{ kg/m}^3$ (20 °C), $\eta = 1 \times 10^{-3} \text{ Pa s}^{-1}$), υπολογίζεται σε 0.1 m/ημέρα. Πειραματικές μετρήσεις βαρυτικής καθίζησης του είδους *Chlorella* υπολόγισαν την ταχύτητα καθίζησης ίση με 3.6 m/ημέρα, αλλά το συγκεκριμένο είδος δεν καθιζάνει με τέτοια ευκολία. Παρόλα αυτά, οι πειραματικές μετρήσεις εμφανίζουν στην πλειοψηφία τους υψηλότερους ρυθμούς καθίζησης από την παραπάνω εξίσωση. Αυτό συμβαίνει διότι η βαρυτική καθίζηση εξαρτάται από την ένταση και την διάρκεια του φωτισμού, την διαθεσιμότητα των θρεπτικών συστατικών και την ηλικία των κυττάρων. [72]

viii. Φιλτράρισμα & Διαλογή (Filtration & Screening)

Κατά τη διαδικασία της διαλογής το αιώρημα περνάει από κόσκινο ορισμένου μεγέθους πόρων. Τα μικροστραγγιστήρια (microstrainers) και τα δονούμενα κόσκινα (vibrating screen filters) αποτελούν δύο από τις βασικότερες και συχνά χρησιμοποιούμενες συσκευές διαλογής για τη συλλογή των μικροφυκών. Τα μικροστραγγιστήρια είναι συσκευές που μπορούν να περιγραφούν ως περιστρεφόμενα φίλτρα με λεπτά πλέγματα και συχνή εμφάνιση του φαινομένου “backwash”. Σε περίπτωση υψηλής συγκέντρωσης μικροφυκών υπάρχει ο κίνδυνος της φραγής του φίλτρου, ενώ σε χαμηλή συγκέντρωση μικροφυκών δεν γίνεται αποτελεσματική συλλογή. Τα μικροστραγγιστήρια έχουν αρκετά πλεονεκτήματα όπως η απλότητα στην κατασκευή και τη λειτουργία τους, ο εύκολος χειρισμός τους, το χαμηλό κόστος επένδυσης, οι ελάχιστες τριβές λόγω απουσίας γρήγορης και απότομης κίνησης των μερών που τα απαρτίζουν και η παρουσία υψηλών ποσοστών διαλογής ως προς το επιθυμητό προϊόν. [34] [71]

Τα φίλτρα που λειτουργούν είτε υπό υψηλές πιέσεις είτε υπό κενό δύνανται να ανακτήσουν μεγάλα μέρη μικροφυκών, αλλά δεν είναι αποτελεσματικά για τα μικροφύκη που έχουν διαστάσεις βακτηρίων. Το φιλτράρισμα εφαπτομενικής ροής (tangential flow filtration) αποτελεί μια διεργασία διαλογής υψηλού ρυθμού (high rate method) για τη συλλογή των μικροφυκών με τα ποσοστά ανάκτησης των τελευταίων σε καλλιέργεια γλυκού νερού να κυμαίνονται 70-89%. Ακόμη, με αυτήν τη μέθοδο παραμένουν αμετάβλητα ορισμένα σημαντικά χαρακτηριστικά των μικροφυκών όπως η δομή, οι ιδιότητες και η κινητικότητα των συλλεγόμενων μικροφυκών, για αυτόν τον λόγο η τεχνική αυτή προτιμάται σε μικροφύκη ευαίσθητα στις έντονες μηχανικές καταπονήσεις, όπως στην περίπτωση της φυγοκέντρωσης. Ειδικότερα, το φιλτράρισμα προτιμάται στη περίπτωση μικρών μονάδων καλλιέργειας μικροφυκών (2 m³/ημέρα), ενώ η φυγοκέντρωση αποτελεί μία πιο οικονομική μέθοδο για μεγαλύτερες παραγωγές (περισσότερο από 20 m³/ημέρα). [34] [71] [76]

Το λειτουργικό κόστος της χρήσης των μικροστραγγιστηρίων στον διαχωρισμό μεγάλων σωματιδίων μικροφυκών από το μίγμα είναι αρκετά χαμηλό. Παρόλα αυτά η χρήση τους παρουσιάζει ορισμένα προβλήματα. Ένα από αυτά είναι η αδυναμία τέλει απομάκρυνσης των στερεών και η δυσκολία χειρισμού των διακύμανση (fluctuation) των

στερεών. Άλλο ένα πρόβλημα το οποίο παρουσιάζεται κατά τη χρήση μικροστραγγιστηρίων είναι η αύξηση της λάσπης, η οποία δημιουργείται από τα βακτήρια και τα φύκη, στο πανί του μικροστραγγιστήριου, γεγονός το οποίο απαιτεί συχνό πλύσιμο της συσκευής. Εναλλακτικά, υπάρχει η δυνατότητα τροποποίησης του επιφανειακού πλέγματος ώστε να μειωθεί η έλξη μεταξύ της διαλυμένης ή των κolloειδών AOM (Allogenic Organic Matters) και της επιφάνειας του συλλέκτη. Το κόστος εφαρμογής φιλτραρίσματος εφαπτομενικής ροής εξαρτάται από την αντικατάσταση της μεμβράνης και την ενεργοβόρο άντληση, παράγοντες οι οποίοι περιορίζουν τη συλλογή σε μεγάλη κλίμακα με τη χρήση αυτής της μεθόδου. Οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των AOM ή των κυττάρων των μικροφυκών με την επιφάνεια των μεμβρανών δεν έχουν προσδιορισθεί με σαφήνεια μέχρι σήμερα. Παρόλα αυτά, οι αλλαγές της επιφανειακής υδροφοβικότητας της μεμβράνης που χρησιμοποιείται στη συγκεκριμένη εφαρμογή ενδέχεται να περιορίσουν την αλλοίωση (fouling) αυτών κατά τη διαδικασία της συλλογής. [34] [71] [73]

ix. Επίπλευση (Flotation)

Η επίπλευση αποτελεί μία διεργασία διαχωρισμού λόγω βαρύτητας κατά την οποία φυσαλίδες αέρα, ή αερίου, προσκολλώνται στα στερεά σωματίδια και μεταφέρουν τα τελευταία στην επιφάνεια του υγρού στο οποίο περιέχονται. Η επίπλευση είναι περισσότερο ωφέλιμη από την καθίζηση όσον αφορά στην απομάκρυνση των μικροφυκών. Με την επίπλευση μπορούν να διαχωριστούν ακόμη και σωματίδια διαμέτρου μικρότερης των 500 μm μέσω σύγκρουσης μιας φυσαλίδας με ένα σωματίδιο και της επακόλουθης προσκόλλησης της πρώτης στο δεύτερο. Επίσης, η τεχνική της επίπλευσης είναι πολύ πιο γρήγορη από αυτήν της καθίζησης, αφού διαρκεί μόνο μερικά λεπτά σε σύγκριση με τη καθίζηση της οποίας η διάρκεια εκφράζεται συνήθως σε ώρες. Ακόμη, το οξυγόνο, το οποίο παράγεται από τα μικροφύκη ως προϊόν της φωτοσύνθεσης των τελευταίων, βοηθά την επίπλευση των μικροφυκών σε ορισμένο βαθμό. Η επιφανειακή τάση των κυττάρων των μικροφυκών μπορεί να τροποποιηθεί, μέσω προθήκης κατάλληλων χημικών παραγόντων, προς όφελος της προσκόλλησης των μικροφυκών στις φυσαλίδες του αέρα που σχηματίζονται στην καλλιέργεια. Ακόμη, ο ρυθμός επίπλευσης των μικροφυκών είναι ανάλογος του λιπιδιακού περιεχομένου αυτών, δηλαδή αυξάνεται με αύξηση του τελευταίου. [34] [76]

Επίσης, η τεχνική της υποβοηθούμενης επίπλευσης, όπως για παράδειγμα η χρήση οξειδωτικού για την αποσταθεροποίηση των αιωρούμενων κυττάρων των μικροφυκών, αποτελεί άλλη μία εναλλακτική, και ταυτόχρονα αποδοτική, μέθοδο για τη συλλογή των μικροφυκών. [34]

Η επίπλευση χωρίζεται σε τρεις υποκατηγορίες βάσει του μεγέθους των φυσαλίδων οι οποίες την προκαλούν. Οι κατηγορίες αυτές είναι η επίπλευση με διαλυμένο αέρα (dispersed air flotation - DAF), η επίπλευση με διεσπαρμένο αέρα και η ηλεκτρολυτική επίπλευση.

a. Επίπλευση με διαλυμένο αέρα (Dissolved Air Flotation - DAF)

Η επίπλευση με διαλυμένο αέρα (Dissolved Air Flotation - DAF) απαιτεί τη χρήση κροκιδωτικού, συνήθως κατιονικών πολυηλεκτρολυτών, σε ένα στάδιο προσυγκέντρωσης των μικροφυκών. Η τεχνική της επίπλευσης με διαλυμένο αέρα (DAF) συνεπάγεται αποσυμπίεση ενός συμπιεσμένου ρευστού προς παραγωγή φυσαλίδων μικρού μεγέθους στο μέσο της καλλιέργειας, οι οποίες στη συνέχεια βοηθούν τα συσσωματώματα των μικροφυκών, μέσω της προσκόλλησης τους σε αυτά, να οδηγηθούν προς την επιφάνεια του μέσου στην οποία σχηματίζουν έναν κυτταρικό αφρό (cell foam) (7-10% ξ.β.), ο οποίος στη συνέχεια συλλέγεται ως λάσπη. Πιο αναλυτικά, πραγματοποιείται μείωση της πίεσης της ροής του νερού, το οποίο περιέχει προκορεσμένο (presaturated) αέρα σε αρκετά υψηλές πιέσεις, ώστε να δημιουργηθούν φυσαλίδες του επιθυμητού μεγέθους (10-100 μm). Οι παράγοντες οι οποίοι επηρεάζουν τη συλλογή με τη μέθοδο της επίπλευσης με διαλυμένο αέρα περιλαμβάνουν την πίεση που επικρατεί στη δεξαμενή, τον ρυθμό αναρροής, τον υδραυλικό χρόνο παραμονής (Hydraulic Retention Time - HRT) και τον ρυθμό επίπλευσης (float rate) των σωματιδίων. [34] [72] [73] [56]

Μία ακόμη περίπτωση αποτελεί η αυτοκροκίδωση των σωματιδίων των μικροφυκών με τη βοήθεια διαλυμένου οξυγόνου μετά την κροκίδωση με τη βοήθεια αλούμινας ή πολυμερούς C-31, το οποίο παράγεται από τη διεργασία της φωτοσύνθεσης. Με χρήση της προηγούμενης μεθόδου, επιτεύχθηκε διαχωρισμός των μικροφυκών από το μίγμα σε ποσοστό 80-90%, όταν η συγκέντρωση των μικροφυκών στην επιφάνεια ήταν 16 mg/L. [34] [73] [56]

Μελέτες έδειξαν ότι η επίπλευση με διαλυμένο αέρα (DAF) είναι πιο αποτελεσματική, όσον αφορά στον διαχωρισμό των μικροφυκών από το μίγμα και εν συνεχεία τη συλλογής τους, από την καθίζηση, αν και απαιτείται κροκίδωση στην πρώτη. Το κύριο πλεονέκτημα της επίπλευσης με διαλυμένο αέρα (DAF) είναι η δυνατότητα αποτελεσματικής εφαρμογής της σε βιομηχανική κλίμακα (10000 m³/ημέρα) με χαμηλό κόστος. Παρόλα αυτά, κύριο μειονέκτημα της μεθόδου αποτελεί η απαίτηση κροκιδωτικού, το οποίο αυξάνει το κόστος και τις πιθανότητες μόλυνσης της καλλιέργειας από αυτό, κάτι το οποίο αποτελεί πρόβλημα στην παραγωγή προϊόντων υψηλής αξίας. [34] [73] [56]

b. Επίπλευση με διεσπαρμένο αέρα (Dispersed Air Flotation)

Η επίπλευση με διεσπαρμένο αέρα συνεπάγεται τη δημιουργία φυσαλίδων μεγέθους 700-1500 μm, οι οποίες σχηματίζονται χρησιμοποιώντας έναν μηχανικό αναμίκτη υψηλής ταχύτητας, ο οποίος περιέχει σύστημα αέριου ψεκασμού. Μελέτες οι οποίες πραγματοποιηθήκαν για την απόδοση της μεθόδου σε τρεις διαφορετικούς συλλέκτες (collectors) έδειξαν ότι ο κατιονικός συλλέκτης CTAB (N-cetyl-N-N-N-trimethylammonium bromide) διαχώρισε επιτυχώς τα σωματίδια του είδους *Scenedesmus quadricauda* από το μίγμα, ενώ ο μη ιονικός συλλέκτης X-100 και το ανιονικό δωδεκυλο-θειϊκό νάτριο (sodium dodecylsulfate) δεν είχαν αποτελεσματική δράση. Αυτές οι διαφορές υπόκεινται στη μεταβολή της υδροφοβικότητας της επιφάνειας σε σχέση με την προσρόφηση του συλλέκτη. [34]

κ. Τεχνικές Ηλεκτροφόρησης (Electrophoresis Techniques)

Η ηλεκτρολυτική μέθοδος προσφέρει άλλη μία διεργασία διαχωρισμού, η οποία δεν χρησιμοποιεί χημικές ουσίες για την επίτευξη του διαχωρισμού αυτού, δηλαδή αποτελεί φυσική μέθοδο, γεγονός το οποίο μειώνει το κόστος παραγωγής, ενώ ταυτόχρονα δεν υπάρχουν ανησυχίες μόλυνσης του προϊόντος. Η αρχή λειτουργίας της μεθόδου περιλαμβάνει μεταφορά των σωματιδίων εκτός του διαλύματος με χρήση ηλεκτρικού πεδίου, κάτι το οποίο οφείλεται στο αρνητικό φορτίο των κυττάρων των μικροφυκών. Η ηλεκτρόλυση σε νερό παράγει υδρογόνο το οποίο προσκολλάται στα συσσωματώματα των μικροφυκών και τα μεταφέρει στην επιφάνεια. Τα οφέλη που προσφέρει η συγκεκριμένη μέθοδος διακρίνονται στη συμβατότητα με το περιβάλλον, την ενεργειακή απόδοση, την ασφάλεια, την εκλεκτικότητα και το μειωμένο κόστος για την επίτευξη του διαχωρισμού. Συγκεκριμένες έρευνες, οι οποίες εκπονήθηκαν σε αντιδραστήρες διαλείποντος έργου και συνεχούς λειτουργίας, με σκοπό τη μελέτη του διαχωρισμού των μικροφυκών ηλεκτρολυτικά με επίπλευση, έδειξαν ότι στο σύστημα διαλείποντος έργου με αύξηση της ηλεκτρικής ισχύος, αυξάνεται ο ρυθμός απομάκρυνσης της χλωροφύλλης και μειώνεται ο χρόνος της ηλεκτρόλυσης. Παρόλα αυτά, τα υψηλά ποσά ηλεκτρικής ισχύος που απαιτούνται για τη λειτουργία της μεθόδου, αυξάνουν σημαντικά τη θερμοκρασία του συστήματος με αποτέλεσμα τη φθορά του και πιο συγκεκριμένα τη φθορά των καθόδων, γεγονός το οποίο αποτελεί ένα από τα κυριότερα μειονεκτήματα της ηλεκτρολυτικής μεθόδου. [34] [56] [77]

Στον παρακάτω πίνακα φαίνεται μία σύγκριση των πιο συνήθως χρησιμοποιούμενων μεθόδων συλλογής μικροφυκών από την καλλιέργεια τους αναφορικά με την ανάκτηση των κυττάρων καθώς και την συγκέντρωσή τους μετά τη συλλογή.

Σύγκριση Μεθόδων Συλλογής Μικροφυκών από την Καλλιέργειά τους		
Τεχνική	Ανάκτηση Κυττάρων (%)	Συγκέντρωση Κυττάρων (%)
Φυγοκέντριση	> 90	12-22
Φιλτράρισμα	70-90	2-27
Βαρυτική Καθίζηση	10-90	0.5-3
Χημική Κροκίδωση	70-95	3-8
Επίπλευση με διαλυμένο αέρα (DAF)	50-90	3-6

Πίνακας III.6.1 [72] [73] [56]

κi. Μελλοντικές Τεχνικές Συλλογής

Έκτος των προαναφερθέντων τεχνικών, υπάρχουν και εναλλακτικοί τρόποι με τους οποίους μπορεί να πραγματοποιηθεί η συλλογή των μικροφυκών από την καλλιέργεια. Οι τεχνικές που αναλύονται στη συνέχεια βρίσκονται, σήμερα, σε ερευνητικό επίπεδο, όμως αποτελούν μεθόδους οι οποίες, στην πλειονότητά τους, οδηγούν σε μείωση του υψηλού κόστους αυτού του σταδίου της αλυσίδας παραγωγής.

a. Κροκίδωση Μικροφυκών με Άλλα Μικροφύκη

Έρευνες οι οποίες βρίσκονται ακόμη σε εργαστηριακό επίπεδο, έδειξαν ότι μπορεί να επιτευχθεί συλλογή ενός είδους μικροφύκους με χρήση άλλου είδους μικροφύκους. Πιο αναλυτικά, τα μικροφύκη που βρίσκονται στην καλλιέργεια μπορούν να κροκιδωθούν με την προσθήκη διαφορετικού είδους μικροφυκών που ακολουθεί αυτοκροκίδωση. Πειράματα που διεξήχθησαν με τη χρήση των ειδών *A. Falcatus* και *S. Obliquus* σε δύο ξεχωριστές καλλιέργειες του είδους *C. Vulgaris* για την κροκίδωση του τελευταίου, όπως και η χρήση του είδους *T. Suecica* για την κροκίδωση του *N. Oleoabundans* έδειξαν την δυναμική αυτής της πρακτικής. Περαιτέρω έρευνα χρειάζεται να εκπονηθεί για την απόδειξη της δυνατότητας εφαρμογής και της βιωσιμότητα αυτής της τεχνικής συλλογής σε βιομηχανικό επίπεδο. [78]

b. Μαγνητική Διαλογή Μικροφυκών

Η μαγνητική διαλογή των μικροφυκών αποτελεί μία πρωτόπορο, γρήγορη και απλή μέθοδο για την αποδοτική συλλογή των μικροφυκών από την καλλιέργεια. Ο διαχωρισμός των μικροφυκών από το μέσο πραγματοποιείται υπό την προσθήκη μαγνητικών σωματιδίων (κυρίως νανοσωματιδίων), τα οποία έλκονται από ένα εξωτερικό μαγνητικό πεδίο. Τα πλεονεκτήματα αυτής της μεθόδου περιλαμβάνουν το χαμηλό κόστος συλλογής, την εξοικονόμηση ενέργειας και την απλή λειτουργία. Παρόλα αυτά, τα εν λόγω σωματίδια έχουν υψηλό κόστος και περιπλοκότητα στον τρόπο σύνθεσης τους, οπότε τέτοιες πρακτικές είναι ακόμη περιορισμένες στην εργαστηριακή κλίμακα. [79]

Τα αποτελέσματα πειραματικών ερευνών προσθήκης νανοσωματιδίων Fe_3O_4 στις καλλιέργειες των μικροφυκών *B. Braunii* και *C. ellipsoidea* έδειξαν ανάκτηση υψηλότερη από 98 % σε 1 λεπτό. Η προσρόφηση των μικροφυκών στα νανοσωματίδια ακολουθεί την ισόθερμη του Langmuir και επηρεάζεται από μεταβολές στο pH, τη δόση των νανοσωματιδίων που προστίθενται και το είδος των μικροφυκών. Διαφορετικές πειραματικές μελέτες με προσθήκη του ίδιου είδους νανοσωματιδίων στο μικροφύκος *Nannochloropsis maritima* είχαν παρόμοια αποτελέσματα. Πιο συγκεκριμένα, ποσοστό υψηλότερο από 95 % των μικροφυκών ανακτήθηκε εντός 4 λεπτών, ενώ η δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης του μέσου της καλλιέργειας συμβάλλει στη μείωση των απαιτήσεων σε θρεπτικά συστατικά. Η μέγιστη ανάκτηση των μικροφυκών από τα νανοσωματίδια επετεύχθη κατά τη διάρκεια της φάσης της μέγιστης παραγωγικότητας αυτών. Τέλος, άλλη μία εργαστηριακή έρευνα, η οποία είχε ως στόχο τη συλλογή των μικροφυκών του είδους *Chlorella vulgaris*, χρησιμοποίησε μαγνητικά μικροσωματίδια οξειδίων σιδήρου (Iron Oxide Magnetic Microparticles - IOMM), τα οποία έχουν χαμηλό κόστος παραγωγής και η σύνθεσή τους ήταν αποτέλεσμα επεξεργασίας $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ με μικροκύματα. Τα μικροφύκη συλλέχθηκαν εντός λίγων λεπτών από την καλλιέργεια και ο απομαγνητισμός των κυττάρων επετεύχθη εντός 1 ώρας. [79] [80] [81]

Παρόλο που η συγκεκριμένη μέθοδος βρίσκεται ακόμη σε επίπεδο εργαστηριακών ερευνών, μπορεί να αποτελέσει μία πρωτοποριακή τεχνική συλλογής των μικροφυκών

εξαλείφοντας τους παράγοντες οι οποίοι επιβαρύνουν τις υπόλοιπες τεχνικές όπως το κόστος της συλλογής και η μόλυνση των μικροφυκών. Τέλος, η μαγνητική διαλογή παρουσιάζει, εκτός των προαναφερθέντων, το πλεονέκτημα τις ανακύκλωσης του μέσου της καλλιέργειας, οπότε και των θρεπτικών συστατικών που περιέχονται σε αυτό.

Τέλος, μία νέα τεχνική αποτελεί η γενετική τροποποίηση των μικροφυκών ώστε αυτά να αποκτήσουν μαγνητικές ιδιότητες και να μπορούν να συγκεντρωθούν με χρήση εξωτερικού μαγνητικού πεδίου. Αυτή η τεχνική αναπτύχθηκε στο εθνικό εργαστήριο του Los Alamos, NM των Ηνωμένων Πολιτειών (Los Alamos National Laboratory - LANL) Η τροποποίηση πραγματοποιήθηκε σε γένος μικροφυκών το οποίο είναι γνωστό ότι σχηματίζει νανοσωματίδια σε μαγνητοτακτικά βακτήρια και το με αυτό τροποποίησαν, γενετικά, πράσινα φύκη (green algae). Τα μαγνητικά νανοσωματίδια που σχηματίζονται μέσα στα φύκη μπορούν να τους αποδώσουν μαγνητικές ιδιότητες, ενώ τα πρώτα μπορούν να συλλεχθούν ξεχωριστά και να χρησιμοποιηθούν ως ουσίες σε φαρμακευτικές και ιατρικές εφαρμογές (biomedical imaging, αντικαρκινικοί παράγοντες). [82] [83] [84]

c. Χρήση Υπερήχων

Μία εναλλακτική τεχνική συλλογής των μικροφυκών είναι η χρήση υπερήχων. Σε αυτήν την περίπτωση, η συγκέντρωση των μικροφυκών οφείλεται στην ηχητική διέγερση τους η οποία ακολουθείται από ενισχυμένη καθίζηση. Οι ενεργειακές απαιτήσεις της μεθόδου είναι αρκετά χαμηλότερες των απαιτήσεων των συμβατικών μεθόδων, όπως η φυγοκέντριση και το φιλτράρισμα, αλλά παράλληλα τα ποσοστά ανάκτησης αυτής της μεθόδου ήταν χαμηλότερα από αυτά των συμβατικών μεθόδων. Παρόλα αυτά, το εν λόγω σύστημα συλλογής παρουσιάζει ορισμένα πλεονεκτήματα όπως η απουσία φαινομένων φραγής από κύτταρα, όπως στην περίπτωση του φιλτραρίσματος με μικροστραγγιστήρια, και πολύ μικρές διατμητικές τάσεις αφού οι συχνότητες των υπερήχων που χρησιμοποιούνται είναι της τάξης των MHz. Τέλος, η τεχνική βρίσκεται ακόμη σε εργαστηριακό επίπεδο, οπότε μελλοντικές μελέτες θα αξιολογήσουν την βιωσιμότητα και την δυνατότητα εφαρμογής της τεχνικής αυτής σε βιομηχανικό επίπεδο. [85]

xii. Επισκόπηση Τεχνικών Συλλογής

Συγκρίνοντας τις διάφορες τεχνικές οι οποίες στοχεύουν στη συλλογή των μικροφυκών από το μίγμα, προκύπτει το συμπέρασμα ότι μόνο η φυγοκέντριση, η κροκίδωση, κυρίως βιολογική και χημική, και η κατακάθιση (settling) αποτελούν οικονομικά βιώσιμες λύσεις. Οι δύο τελευταίες μέθοδοι παρουσιάζουν χαμηλότερες ενεργειακές απαιτήσεις σε σύγκριση με την πρώτη η οποία παρά το υψηλό κόστος, προσφέρει υψηλές αποδόσεις συλλογής, όμως υπάρχει ο κίνδυνος κατάρρευσης της κυτταρικής δομής με έντονη φυγοκέντριση, ανάλογα με το είδος των μικροφυκών προς συλλογή. Στις ανοικτές λίμνες, συνήθως χρησιμοποιείται είτε καθίζηση είτε επίπλευση, ενώ στους φωτοβιοαντιδραστήρες χρησιμοποιούνται οι τεχνικές της φυγοκέντρισης και του φιλτραρίσματος.

Η βέλτιστη, στην ιδανική περίπτωση, μέθοδος συλλογής των μικροφυκών από το μίγμα πρέπει να είναι ανεξάρτητη του είδους των μικροφυκών και να χρησιμοποιεί όσο το δυνατόν λιγότερες χημικές ουσίες και ενέργεια, που αποτελούν παράγοντες οι οποίοι επιβαρύνουν το κόστος, και, αν αυτό καθίσταται δυνατόν, να απελευθερώνει επιλεκτικά ορισμένα ενδοκυτταρικά υλικά τα οποία μπορούν να συλλεχθούν στη συνέχεια. Η καλλιέργεια μικροφυκών σε μεγάλη κλίμακα απαιτεί υψηλό ρυθμό υπερχειλίσης (overflow), ο οποίος επιτυγχάνεται με τη διαδικασία της επίπλευσης κατά την οποία τα φύκη κατευθύνονται προς τα πάνω σε αντίθεση με την καθοδική πορεία την οποία ακολουθούν κατά την καθίζηση. Η βαρυτική καθίζηση χρησιμοποιείται περισσότερο για τον διαχωρισμό μεγάλων σωματιδίων, όπως η *Spirulina*. Η προσθήκη οξειδωτικού μέσου στο σύστημα βελτιώνει τον διαχωρισμό των μικροφυκών και αυξάνει τον ρυθμό της καθίζησης. Αν υπάρχει μεγάλη έκταση εδάφους η οποία μπορεί να αξιοποιηθεί για την καλλιέργεια και ταυτόχρονα δεν ενδιαφέρει η μόλυνση ή μη του τελικού προϊόντος από πηκτικά μέσα, τότε χρησιμοποιείται βαρυτική καθίζηση η οποία, δρώντας μόνη της, συγκεντρώνει το αιώρημα των μικροφυκών σε ποσοστό 1.5% w/w στερεών με ελάχιστο κόστος. [34]

Η προτεινόμενη λύση για την μερική εξισορρόπηση της απόδοσης της συλλογής των μικροφυκών με το κόστος αυτής συνδυάζει τη φυγοκέντριση με την κροκίδωση. Πιο συγκεκριμένα, το στάδιο της κροκίδωσης προηγείται αυτού της φυγοκέντρισης με στόχο την αύξηση της συγκέντρωσης των μικροφυκών πριν τη φυγοκέντριση, ώστε να μειωθούν οι ενεργειακές απαιτήσεις, συνεπακόλουθα και το κόστος, αυτής για την επίτευξη της επιθυμητής συγκέντρωσης των συλλεγμένων μικροφυκών. Στην περίπτωση, που το είδος των μικροφυκών είναι ευαίσθητο στην φυγοκέντριση, οπότε υπάρχει πιθανότητα κατάρρευσης της κυτταρικής δομής κατά το στάδιο αυτό, προτιμώνται εναλλακτικές τεχνικές, όπως το φιλτράρισμα (microfiltration) το οποίο όμως δεν είναι αποτελεσματικό σε μονάδες μεγάλης δυναμικότητας. Μία εναλλακτική τεχνική που μπορεί να χρησιμοποιηθεί είναι η επίπλευση με διαλυμένο αέρα (Dissolved Air Flotation – DAF), η οποία όμως παρουσιάζει προβλήματα λόγω της χρήσης των κροκιδωτικών, όπως και η λύση που προτείνεται, αλλά ταυτόχρονα δεν επιτυγχάνει την απόδοση της συλλογής και την συγκέντρωση των μικροφυκών που επιτυγχάνεται με τον συνδυασμό της κροκίδωσης με την φυγοκέντριση. [71] [56]

Τέλος, η συγκέντρωση των μικροφυκών μετά τη συλλογή, υπό την εφαρμογή διαφόρων μεθόδων, υπολογίζεται από 0.5% έως 27% ξ.β., οπότε η περαιτέρω απονέρωση/ξήρανση των μικροφυκών κρίνεται χρήσιμη, από τεχνικής πλευράς, πριν την επεξεργασία της βιόμαζας των μικροφυκών στα επόμενα στάδια. [72]

7. Εξαγωγή Λιπιδίων από τα Μικροφύκη και Μετατροπή τους σε Βιοντίζελ

i. Εισαγωγή

Η εξαγωγή των λιπιδίων από τα μικροφύκη αποτελεί τον λιγότερο ανεπτυγμένο τομέα στη βιομηχανία παραγωγής βιοντίζελ από μικροφύκη σε παγκόσμιο επίπεδο. Πληθώρα επιλογών πρέπει να ληφθεί υπόψη για την αντιμετώπιση των επιμέρους σταδίων αυτής της διαδικασίας.

Αντίθετα από τους περισσότερους φυτικούς οργανισμούς του εδάφους, τα μικροφύκη καλλιεργούνται ως αραιά αιωρήματα σε υδατικά συστήματα, γεγονός το οποίο καθιστά δύσκολη την εξαγωγή των λιπιδίων από αυτά. Ορισμένες από τις επιλογές αυτές προέρχονται από τη διαδικασία παραγωγής σογιέλαιου. Οι υπόλοιπες προκύπτουν ως αποτέλεσμα πολυετούς έρευνας και εργαστηριακών μελετών μετατροπής μικροφυκών σε βιοντίζελ. Ακόμη, συχνή εφαρμογή βρίσκει η χρήση υπερκρίσιμων ρευστών για την εξαγωγή των λιπιδίων από τα μικροφύκη και τη μετέπειτα επεξεργασία τους ώστε να παραχθεί βιοντίζελ. [49] [86]

Προς ευκολία κατανόησης των τεχνικών που ακολουθούνται με στόχο την εξαγωγή των λιπιδίων από τα μικροφύκη και τη μετέπειτα επεξεργασία των τελευταίων προς βιοντίζελ (μετεστεροποίηση) κρίνεται, σε αυτό το σημείο, αναγκαία η εμβάθυνση στο θεωρητικό υπόβαθρο, σε βιοτεχνολογικό επίπεδο, της διεργασίας αυτής. Ως εκ τούτου, ακολουθεί ανάλυση των βιοχημικών σταδίων και διαδικασιών καθώς και των συστατικών που χρησιμοποιούνται σε κάθε στάδιο. [87]

Τα λιπαρά οξέα (Fatty Acids – FA) είναι μόρια τα οποία αποτελούνται από μία υδρόφιλη καρβοξυλική ομάδα προσκολλημένη σε μία υδρόφοβη υδρογονανθρακική αλυσίδα. Τα λιπαρά οξέα αποτελούν συστατικά των μορίων των λιπιδίων, αμφότερων ουδέτερων και πολικών, και κατηγοριοποιούνται με κριτήριο δύο βασικά χαρακτηριστικά τα οποία κατέχουν. Αυτά είναι ο συνολικός αριθμός ατόμων άνθρακα της υδρογονανθρακικής αλυσίδας και το πλήθος των διπλών δεσμών κατά μήκος της αλυσίδας αυτής. Τα κορεσμένα λιπαρά οξέα δεν παρουσιάζουν διπλό δεσμό, ενώ τα ακόρεστα έχουν τουλάχιστον ένα διπλό δεσμό στο μόριο τους. Όταν στο καρβοξυλικό μέρος της αλυσίδας προσκολλάται μία ουδέτερη χημική ομάδα (π.χ. γλυκερόλη), δημιουργείται ένα ουδέτερο μόριο λιπιδίου (π.χ. τριακυλγλυκερόλη) (triacylglycerole – TAG). Όταν η ομάδα που προσκολλάται στο καρβοξυλικό μέρος φέρει φορτίο (π.χ. σύμπλοκο γλυκερόλης και φωσφορικών ιόντων), τότε δημιουργείται ένα πολικό μόριο λιπιδίου (π.χ. φωσφολιπίδιο). [87]

Η κατηγοριοποίηση των λιπιδίων γίνεται βάσει της πολικότητας της ομάδας που προσκολλάται στο καρβοξυλικό μέρος και διαμορφώνεται ως εξής: (a) ουδέτερα λιπίδια τα οποία περιλαμβάνουν ακυλγλυκερόλες και ελεύθερα λιπαρά οξέα (Free Fatty Acids – FFA) και (b) πολικά λιπίδια τα οποία διαχωρίζονται σε δύο υποκατηγορίες: (i) φωσφολιπίδια (PL) και (ii) γλυκολιπίδια (GL). Τα ουδέτερα λιπίδια χρησιμοποιούνται κυρίως για την αποθήκευση της ενέργειας, ενώ τα πολικά συγκεντρώνονται ακολουθιακά εν παραλλήλω και συνιστούν διπλοστοιβάδες κυτταρικών μεμβρανών. Οι ακυλγλυκερόλες αποτελούνται

από λιπαρά οξέα συνδεδεμένα, με εστερικό δεσμό, σε αλυσίδες γλυκερόλης και κατηγοριοποιούνται βάσει του αριθμού των περιεχόμενων λιπαρών οξέων σε τριακυλγλυκερόλες (TG ή TAG), διακυλγλυκερόλες (DG) και μονοακυλγλυκερόλες (MG). Όσον αφορά στα ελεύθερα λιπαρά οξέα, εκείνα είναι το αποτέλεσμα του δεσμού λιπαρών οξέων σε άτομα υδρογόνου. Ακόμη, υπάρχουν κι άλλες κατηγορίες ουδέτερων λιπαρών οξέων, τα οποία, όμως, δεν μπορούν να μετατραπούν σε βιοντίζελ, αυτά είναι: υδρογονάνθρακες (HC), στερόλες (ST), κετόνες (K) και χρωστικές όπως καροτίνες και χλωροφύλλες. [87]

Οι ακυλγλυκερόλες προτιμώνται στη βιομηχανική παραγωγή βιοντίζελ για δύο, κυρίως, λόγους. Πρώτον, η βιομηχανικής κλίμακας μετεστεροποίηση με χρήση αλκαλικού καταλύτη είναι σχεδιασμένη για την επεξεργασία αυτών (TG, DG, MG), ενώ παρουσιάζει περιορισμένη αποτελεσματικότητα στην επεξεργασία άλλων ομάδων λιπιδίων, όπως πολικά λιπίδια και ελεύθερα λιπαρά οξέα. Δεύτερον, οι ακυλγλυκερόλες παρουσιάζουν μικρότερο επίπεδο κορεσμού συγκριτικά με τις υπόλοιπες ομάδες λιπιδίων, ως εκ τούτου παράγουν μεθυλεστέρες λιπαρών οξέων (Fatty Acid Methyl Esters – FAME) με μεγαλύτερη αντοχή στην οξείδωση. Πειραματικές μελέτες που διεξήχθησαν στο στέλεχος *Chlorella vulgaris*, το οποίο περιέχει σε μεγάλο ποσοστό λιπαρά οξέα με μήκος αλυσίδας C₁₆ και C₁₈, έδειξαν ότι η αναλογία τους στη μάζα του μικροφύκου αυξήθηκε σε κατάσταση περιορισμένων φωσφορικών ιόντων (PO₄³⁻) και αυξημένου καδμίου (Cd). Αυτή η τεχνική αφενός οδηγεί σε αυξημένα επίπεδα TAG κατά την εξαγωγή των λιπιδίων, οπότε αύξηση και της παραγόμενης ποσότητας βιοντίζελ, αφετέρου, όμως, ο περιορισμός PO₄³⁻ δρα αρνητικά στο στάδιο της φωτοσύνθεσης, επομένως της ανάπτυξης των μικροφυκών, και το Cd αποτελεί έναν τοξικό παράγοντα ο οποίος περιορίζει τις χρήσεις της τελικής βιομάζας των μικροφυκών. [87] [88]

Στην παραγωγική διαδικασία, η εξαγωγή των λιπιδίων τοποθετείται μετά από την καλλιέργεια και την συλλογή των μικροφυκών. Τα συγκεντρωμένα, και ταυτόχρονα αποξηραμένα, μικροφύκη οδηγούνται σε ένα στάδιο προεπεξεργασίας πριν λάβει χώρα η εξαγωγή των λιπιδίων. Κατά τη διάρκεια της τελευταίας, τα λιπίδια εξάγονται από τα κύτταρα με τη χρήση διαλύτη. Έπειτα, διαχωρίζονται από την κυτταρική βιομάζα και απομονώνονται από τον διαλύτη και το νερό που έχει απομείνει. Τέλος, τα λιπίδια μετατρέπονται σε βιοντίζελ στο στάδιο της μετεστεροποίησης. [87]

Οι διαλύτες των οποίων η χρήση συνηθίζεται στη βιομηχανία για την εξαγωγή των λιπιδίων είναι το εξάνιο και το χλωροφόρμιο. Το πρώτο είναι λιγότερο αποδοτικό σε σύγκριση με το δεύτερο, όμως ταυτόχρονα αποτελεί μία λιγότερο τοξική χημική ένωση. Επίσης, το εξάνιο είναι περισσότερο εκλεκτικό ως προς τα ουδέτερα λιπίδια. [89]

ii. Προεπεξεργασία των Μικροφυκών

Η προεπεξεργασία των μικροφυκών, μέσω της διάσπασης των κυττάρων αυτών, συνεπάγεται αυξημένες αποδόσεις κατά την εξαγωγή των λιπιδίων, αλλά και αύξηση του λειτουργικού κόστους της διαδικασίας παραγωγής. Αυτό συμβαίνει διότι ο διαλύτης κατά την εξαγωγή των λιπιδίων μπορεί να έρθει σε άμεση επαφή με τα ελεύθερα λιπίδια στον διακυτταρικό χώρο, πιο συγκεκριμένα στο μέσο στο οποίο αυτά περιέχονται, χωρίς να χρειάζεται να εισχωρήσει στην κυτταρική δομή. Οπότε αποφεύγονται τα φαινόμενα

μεταφοράς των λιπιδίων και του διαλύτη στην κυτταρική μεμβράνη, κάτι το οποίο περιορίζει την απόδοση της διαδικασίας της εξαγωγής των λιπιδίων. Εναλλακτικά, μπορεί να ακολουθηθεί άμεση εξαγωγή των λιπιδίων με κατάλληλο διαλύτη, τεχνική η οποία δεν είναι απαραίτητα αποδοτική και τεχνικοοικονομικά βιώσιμη σε βιομηχανική κλίμακα. [87] [90]

Η πλειοψηφία των διαθέσιμων μεθόδων για τη διάσπαση των κυττάρων, όπως ομογενοποίηση σε υψηλές πιέσεις, άλεση σωματιδίων και επεξεργασία με υπέρηχους, απαιτεί παρουσία νερού στη βιόμαζα των μικροφυκών. Ως εκ τούτου, πρέπει να αποφεύγεται η ξήρανση των μικροφυκών πριν την διάσπαση των κυττάρων, αλλιώς δεν θα είναι δυνατή η επεξεργασία των μικροφυκών από το στάδιο της κυτταρικής διάσπασης. Μέχρι στιγμής, υπάρχουν δύο υποθέσεις για το ρόλο του νερού σε αυτό το στάδιο. Η πρώτη παρουσιάζει το νερό ως φράγμα που εμποδίζει την αποδοτική μεταφορά των λιπιδίων από το εσωτερικό προς το εξωτερικό του κυττάρου όπου βρίσκεται ο διαλύτης. Επομένως, η απονέρωση των μικροφυκών τοποθετείται πριν την εξαγωγή των λιπιδίων, προς όφελος της απόδοσης της τελευταίας. Η δεύτερη υπόθεση, θέτει το νερό ως καταλύτη της εξαγωγής των λιπιδίων αφού εκείνο διογκώνει τα κύτταρα και διευκολύνει την πρόσβαση του διαλύτη στα λιπίδια. Σε αυτήν την περίπτωση η απονέρωση της βιόμαζας των μικροφυκών κρίνεται ασύμφορη και μπορεί να προκαλέσει αναστολή της μεταφοράς των λιπιδίων στον διαλύτη και αντίστροφα. Αυτή η υπόθεση στηρίζεται και σε περιπτώσεις μικροοργανισμών, όπως βακτήρια, ζύμες και ιοί, στους οποίους η εξαγωγή των λιπιδίων έλαβε χώρα στην υγρή τους μορφή, όπου το περιεχόμενο τους σε νερό ήταν της τάξης του 90%, με τη χρήση πολικών ή μη πολικών οργανικών διαλυτών. [87]

Πιο αναλυτικά, το στάδιο της προεπεξεργασίας των μικροφυκών το οποίο έπεται του σταδίου της συλλογής, ενώ λαμβάνει χώρα πριν την εξαγωγή των λιπιδίων, έχει ως στόχο την αύξηση της απόδοσης της τελευταίας. Στο στάδιο αυτό υπάρχει πληθώρα επιλογών επεξεργασίας των μικροφυκών όπως φαίνεται και στην εικόνα των σταδίων επεξεργασίας στο παράρτημα (Σχήμα Π.2). Η προεπεξεργασία μπορεί να γίνει σε ένα ή περισσότερα στάδια. Πολλά από αυτά τα στάδια, όπως η θερμική ξήρανση για πλήρη απομάκρυνση του νερού και η ομογενοποίηση υψηλή πίεσης για διάσπαση των κυττάρων, είναι αρκετά ενεργοβόρα, οπότε προτιμώνται μόνο σε περιπτώσεις αναγκαίας αύξησης της απόδοσης της εξαγωγής των λιπιδίων. Κατά το στάδιο της προεπεξεργασίας μπορεί να μεταβληθεί ο βαθμός διάσπασης των κυττάρων, του εναπομείναντος νερού και, στην περίπτωση της αποξηραμένης σκόνης των μικροφυκών, το μέγεθος των σωματιδίων. [87]

a. Απονέρωση

Η απονέρωση, η οποία συνήθως επιτυγχάνεται με την ξήρανση των μικροφυκών, αποτελεί ένα αναγκαίο στάδιο για την αύξηση της απόδοσης της εξαγωγής των λιπιδίων από αυτά. Παρόλα αυτά ορισμένη ποσότητα νερού πρέπει να έχει παραμείνει σε αυτά, ώστε να λειτουργήσει αποτελεσματικά η διάσπαση των κυττάρων, η οποία θα αναλυθεί στη συνέχεια. Η απονέρωση αποτελεί μία αρκετά ενεργοβόρα διεργασία λόγω της υψηλής ενθαλπίας εξάτμισης του νερού (ΔH_{vap}). Πιο συγκεκριμένα, αποτελεί περίπου το 30% του συνολικού κόστους παραγωγής. Οπότε, σε μία ανάλυση βιωσιμότητας της παραγωγής βιοντίζελ από μικροφύκη πρέπει να γίνεται σύγκριση της απόδοσης της διεργασίας

παραγωγής βιοντίζελ από υγρά μικροφύκη, χωρίς απονέρωση, έναντι του κόστους της απονέρωσης, σε βάση κέρδους ή ζημίας της επιχείρησης. [89]

Σε αυτό το σημείο είναι σημαντικό να επισημανθεί το γεγονός ότι η εξαγωγή των λιπιδίων από υγρά μικροφύκη δεν χρησιμοποιείται σε βιομηχανική κλίμακα, παρά μόνο σε εργαστηριακή. Επίσης, η απαιτούμενη ενέργεια για την εξαγωγή των λιπιδίων από υγρά μικροφύκη είναι σημαντικά υψηλότερη από εκείνη για τα ξηρά μικροφύκη, τα οποία απαιτούν την ύπαρξη του σταδίου της απονέρωσης, ή της ξήρανσης, το οποίο είναι, επίσης, αρκετά ενεργοβόρο. [37]

Στην περίπτωση που ακολουθείται ξήρανση των μικροφυκών υπάρχουν αρκετές διαθέσιμες τεχνικές για την επίτευξη αυτής. Συνοπτικά, αυτές είναι: ηλιακή ξήρανση, “shelf drying” σε χαμηλές πιέσεις, ξήρανση σε δοχείο (drum drying), ξήρανση με ψεκασμό (spray drying), ξήρανση ρευστοποιημένης κλίνης (fluidized bed drying), “freeze drying” και τεχνολογία αφυδάτωσης “refractance window” (refractance window dehydration technology). [51]

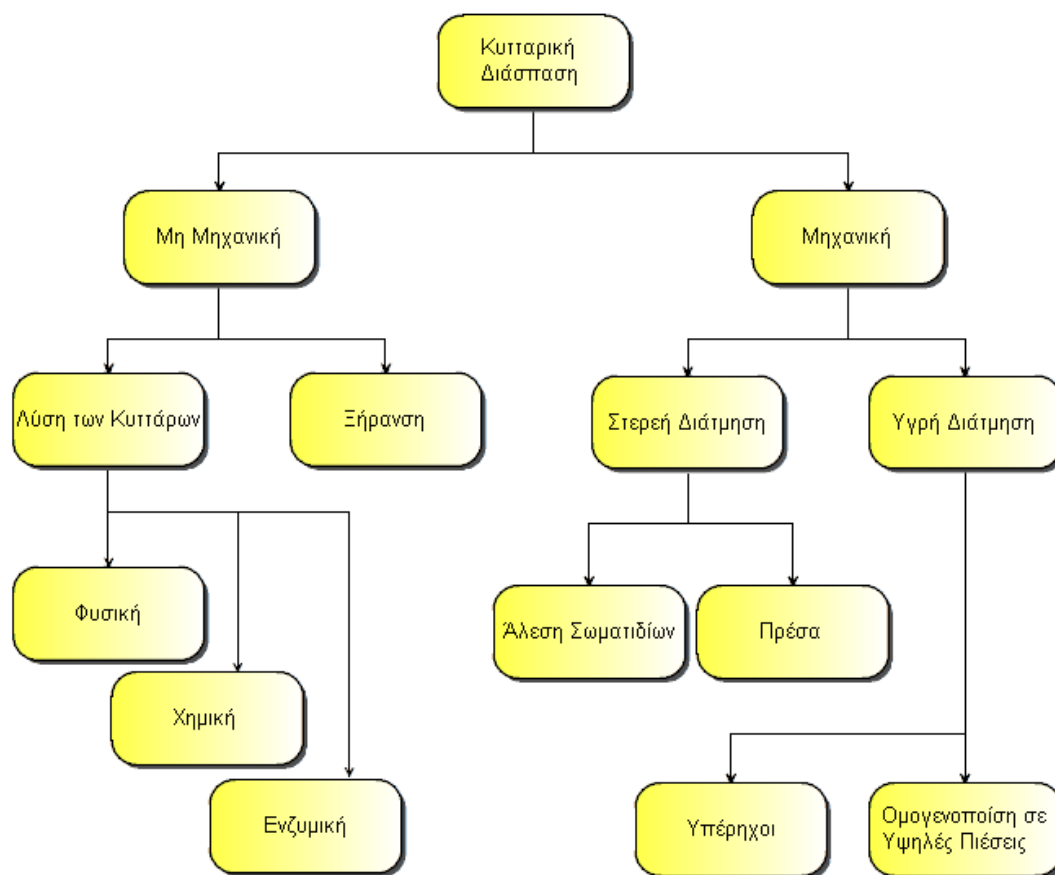
Η ηλιακή ξήρανση αποτελεί μία τεχνική χαμηλού κόστους, όμως απαιτεί πολύ χρόνο και μεγάλη επιφάνεια, ενώ υπάρχει ο κίνδυνος της απώλειας ορισμένων βιοδραστικών (bioreactive) προϊόντων. Πιο συγκεκριμένα, σε μια καλοκαιρινή ημέρα με έντονη ηλιοφάνεια, η ξήρανση καλλιέργειας μικροφυκών με περιεχόμενη υγρασία χαμηλότερη από 10% απαιτεί από 3 έως 5 ώρες, ανάλογα με την τοποθέτηση των μικροφυκών σε αυτή. Άλλη μία μέθοδος ξήρανσης χαμηλού κόστους είναι η τεχνική “shelf drying” σε χαμηλές πιέσεις, η οποία, όμως, παράλληλα με το χαμηλό κόστος παρουσιάζει χαμηλές αποδόσεις. Οι υπόλοιπες τεχνικές έχουν συγκριτικά αυξημένο κόστος, αλλά παρουσιάζουν ταυτόχρονα αυξημένες αποδόσεις. [51] [91]

Μια από τις προτεινόμενες τεχνικές αποτελεί η διεργασία “freeze drying”, η οποία προτιμάται από τη θερμική ξήρανση, λόγω των ομαλών λειτουργικών συνθηκών της πρώτης και του γεγονότος ότι κατά τη θερμική ξήρανση, παρότι αυτή χρησιμοποιείται συχνά σε εργαστηριακή κλίμακα, υποβαθμίζονται τα θερμοευαίσθητα λιπίδια, υπάρχει απώλεια των πτητικών λιπιδίων. Σημαντικός παράγοντας για την επιλογή της απονέρωσης, ή της ξήρανσης, των μικροφυκών είναι η αύξηση της απόδοσης της εξαγωγής των λιπιδίων, λόγω της μείωσης του μεγέθους των σωματιδίων, η οποία είναι το φυσικό αποτέλεσμα της συσσώρευσης των μικροφυκών μετά την απομάκρυνση του νερού και την επακόλουθη άλεση των σωματιδίων σε διαφορετικά μεγέθη. Η μείωση του μεγέθους των σωματιδίων έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της επιφάνειας για την αλληλεπίδραση της βιόμαζας με τον διαλύτη και τη μείωση της διαδρομής των μορίων του τελευταίου κατά τη διάχυση. Παρόλα αυτά, υπερβολική μείωση του μεγέθους των σωματιδίων μπορεί να επιφέρει αντίθετα αποτελέσματα στη διαδικασία, αφού σε αυτήν την περίπτωση υπάρχει πιθανότητα επαναπροσρόφησης (re-adsorption) των λιπιδίων στα μικροφύκη, την ανομοιογενή εξαγωγή των λιπιδίων και φαινόμενα “fluid channeling” στο δοχείο όπου γίνεται η εξαγωγή, στην περίπτωση εξαγωγής των λιπιδίων με υπερκρίσιμο CO₂. [87]

b. Διάσπαση των Κυττάρων

Κατά το στάδιο της προεπεξεργασίας λαμβάνει χώρα η διάσπαση των κυττάρων των μικροφυκών με στόχο την απελευθέρωση των λιπιδίων, ώστε να ακολουθήσει μετεστεροποίηση τους προς βιοντίζελ. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, η διάσπαση των κυττάρων είναι μια ενεργοβόρα, αλλά αναγκαία διαδικασία για την προεπεξεργασία της βιόμαζας των μικροφυκών, ώστε να αυξηθεί η απόδοση της εξαγωγής των λιπιδίων από αυτά.

Στην εικόνα III.7.1, φαίνονται, υπό μορφή διαγράμματος, οι διαθέσιμες τεχνικές για τη διάσπαση των κυττάρων, η κατηγοριοποίησή τους και οι συνδέσεις που υπάρχουν μεταξύ τους.



Εικόνα III.7.1 [92]

Οι τεχνικές διάσπασης των κυττάρων διακρίνονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες: τις μηχανικές και τις μη μηχανικές. Στη πρώτη κατηγορία ανήκουν η στερεή και η υγρή διάτμηση. Πιο αναλυτικά, η στερεή διάτμηση περιλαμβάνει την επεξεργασία με πρέσα και την άλεση των σωματιδίων των μικροφυκών. Η υγρή διάτμηση, από την άλλη πλευρά, περιλαμβάνει την επεξεργασία μέσω υπερήχων και την ομογενοποίηση σε υψηλές πιέσεις. Στις μη μηχανικές τεχνικές ανήκουν η λύση των κυττάρων και η ξήρανση. Η λύση των κυττάρων μπορεί να λάβει χώρα είτε με φυσικό (πίεση, οσμωτικό σοκ) είτε με χημικό τρόπο (απορρυπαντικά, διαλύτες, αντιβιοτικά) είτε ενζυμικά. [92]

Από τις παραπάνω τεχνικές για τη διάσπαση των κυττάρων, οι μηχανικές είναι οι πιο δημοφιλείς σε βιομηχανική κλίμακα. Πιο αναλυτικά, οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται συχνά στις αντίστοιχες βιομηχανικές διεργασίες είναι δύο: η ομογενοποίηση σε υψηλές πιέσεις και η άλεση των σωματιδίων. Η πρώτη χρησιμοποιείται, κυρίως σε βακτήρια και ζύμες (yeasts), ενώ η δεύτερη για yeast cells, μυκκύλια (mycelia organisms) και φύκη. Ως εκ τούτου, στην περίπτωση που εξετάζεται, προτιμάται η χρήση της τεχνικής της άλεσης των σωματιδίων, ως ένα στάδιο προεπεξεργασίας των μικροφυκών πριν την εξαγωγή των λιπιδίων από αυτά. Άλλο ένα στοιχείο που μπορεί να προκύψει, από την μέχρι στιγμής έρευνα στον τομέα της κυτταρικής διάσπασης, είναι ότι οι μηχανικές μέθοδοι για την επίτευξη αυτής δεν καταστρέφουν τα ενδοκυτταρικά ένζυμα και τις πρωτεΐνες, στην πλειοψηφία αυτών. Μοναδικές εξαιρέσεις, ίσως, αποτελούν τα ένζυμα της κυτταρικής μεμβράνης και τα πολυενζυμικά σύμπλοκα. Τέλος, ο συνδυασμός δύο τεχνικών από τις παρακάτω μπορεί να αποτελέσει μία λύση αντιμετώπισης δύσκολων, στη κυτταρική διάσπαση, οργανισμών. Οι τεχνικές αυτές είναι το “freeze-pressing”, η χρήση υπερύθρων και η ενζυμική λύση. [71] [92]

Πειραματικές μελέτες που διεξήχθησαν με χρήση των στελεχών *Botryococcus sp.*, *Scenedesmus sp.* και *Chlorella vulgaris*, έδειξαν ότι η διάσπαση των κυττάρων, στην περίπτωση του στελέχους *Chlorella vulgaris*, με τη χρήση είτε αυτόκλειστου είτε μικροκυμάτων ήταν αποδοτικότερη σε σύγκριση με τις άλλες μεθόδους. Επίσης, να σημειωθεί ότι τα πειράματα έγιναν παρουσία διαλύτη μίγματος χλωροφορμίου - μεθανόλης (1/1 v/v), ενώ η άλεση των σωματιδίων δεν ήταν τόσο αποδοτική, αφού παρήγαγε 0.079 g λιπιδίων ανά g ξηρής βιόμαζας μικροφυκών. Τέλος, οι μελέτες αυτές βασίζονται σε πειραματική κλίμακα, ενώ σε βιομηχανική κλίμακα η άλεση των σωματιδίων παρουσιάζεται ως η πλέον αποδοτική, όποτε και ενδεδειγμένη, μέθοδος. [71] [87] [92]

Τέλος, η κυτταρική διάσπαση έχει ως αποτέλεσμα των διαχωρισμό των λιπιδίων και της βιόμαζας από την οποία αυτά προέρχονται. Αμφότερα τα δύο προϊόντα της διάσπασης των κυττάρων οδηγούνται στο στάδιο της μετεπεξεργασίας. Πιο αναλυτικά, η επεξεργασία της βιόμαζας οδηγεί σε προϊόντα όπως καύσιμα, πρωτεΐνες και άλλα χημικά προϊόντα, για παράδειγμα χρωστικές και προϊόντα υψηλής προστιθέμενης αξίας. Από την άλλη πλευρά, η επεξεργασία των λιπιδίων οδηγεί στην παραγωγή βιοντίζελ μέσω γνωστών τεχνικών που ήδη εφαρμόζονται στην περίπτωση παραγωγής βιοντίζελ από λιπίδια φυτικών οργανισμών (μετεστεροποίηση). [90]

Μετά την εξαγωγή των λιπιδίων μπορεί να χρειάζεται περαιτέρω διαχωρισμός των χρήσιμων λιπιδίων για την παραγωγή βιοντίζελ από τα υπόλοιπα. Χρήσιμα χαρακτηρίζονται τα λιπίδια τα οποία είναι συμβατά με τις κοινές διεργασίες μετεστεροποίησης. Η τριακυλγλυκερόλη (TAG), θεωρείται χαρακτηριστικός εκπρόσωπος αυτής της κατηγορίας λιπιδίων, ενώ τα φωσfolιπίδια υπάρχει πιθανότητα να περιπλέξουν τη διεργασία παραγωγής βιοντίζελ, λόγω του φωσφόρου και του αζώτου που βρίσκονται στις πολικές κεφαλές αυτών, τα οποία μπορούν να εμποδίσουν την μετεστεροποίηση τους. Παρόλα αυτά, δεν έχει αποσαφηνιστεί ποια λιπίδια είναι χρήσιμα και ποια όχι, εκτός των δύο περιπτώσεων που αναφέρθηκαν προηγουμένως. [90]

iii. Εξαγωγή των Λιπιδίων από τα Μικροφύκη

a. Χρήση Οργανικών Διαλυτών

Η χρήση οργανικών διαλυτών για την εξαγωγή των λιπιδίων από τα μικροφύκη βασίζεται στη βασική χημική αρχή: «όμοια διαλύουν όμοια». Τα ουδέτερα λιπίδια, που βρίσκονται στο κυτταρόπλασμα, αλληλεπιδρούν μεταξύ τους μέσω των υδροφοβικών αλυσίδων τους και σχηματίζουν σφαιρίδια. Ο μηχανισμός εξαγωγής των λιπιδίων αναλύεται στη συνέχεια. [87]

Πρώτα, ο μη-πολικός οργανικός διαλύτης, συνήθως εξάνιο ή χλωροφόρμιο, εισέρχεται στο κυτταρόπλασμα μέσω της κυτταρικής μεμβράνης και αλληλεπιδρά με τα ουδέτερα λιπίδια μέσω δεσμών van der Waals ώστε να σχηματιστούν σύμπλοκα διαλύτη-λιπιδίων. Τα σύμπλοκα αυτά οδηγούνται, από τη βαθμίδα της συγκέντρωσης, σε διάχυση διαμέσου της κυτταρικής μεμβράνης και του στατικού υμένα του οργανικού διαλύτη, ο οποίος συντίθεται ως αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης του οργανικού διαλύτη με το κυτταρικό τοίχωμα, το οποίο πλέον περιβάλλει, ενώ ταυτόχρονα παραμένει αμετάβλητος από τη ροή του διαλύτη και την αλληλεπίδραση του με αυτόν. Το αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας είναι η έξοδος των ουδέτερων λιπιδίων από το κύτταρο προς τη μάζα του διαλύτη, στον οποίο πλέον παραμένουν σε διαλυμένη μορφή. [87]

Επίσης, ορισμένα λιπίδια βρίσκονται στο κυτταρόπλασμα συμπλοκοποιημένα με πολικά λιπίδια. Τα σύμπλοκα αυτά συνδέονται, μέσω δεσμών υδρογόνου, με πρωτεΐνες της κυτταρικής μεμβράνης. Οι αλληλεπιδράσεις, τύπου van der Waals, μεταξύ του μη-πολικού οργανικού διαλύτη και των ουδέτερων λιπιδίων των συμπλόκων αυτών δεν είναι ικανές να διασπάσουν τις δομές αυτές. Το τελευταίο μπορεί να επιτευχθεί με χρήση πολικών οργανικών διαλυτών, όπως μεθανόλη και ισοπροπανόλη, οι οποίοι δημιουργούν δεσμούς υδρογόνου με τα πολικά λιπίδια των συμπλόκων αυτών. Σε αυτήν την περίπτωση οι πολικοί και οι μη-πολικοί διαλύτες εισάγονται ταυτόχρονα στο σύστημα. [87]

Ο μηχανισμός της δράσης αυτής ξεκινά με την εισχώρηση των οργανικών διαλυτών, πολικού και μη, στο κυτταρόπλασμα μέσω της κυτταρικής μεμβράνης. Στη συνέχεια, οι διαλύτες αλληλεπιδρούν με τα εν λόγω σύμπλοκα των λιπιδίων. Πιο αναλυτικά, ο μη-πολικός οργανικός διαλύτης περιβάλλει το σύμπλοκο και σχηματίζει δεσμούς van der Waals με τα ουδέτερα λιπίδια αυτού, ενώ παράλληλα ο πολικός οργανικός διαλύτης σχηματίζει δεσμούς υδρογόνου με τα πολικά λιπίδια του ίδιου συμπλόκου. Οι δεσμοί υδρογόνου είναι αρκετά ισχυροί ώστε να εκτοπίσουν τους δεσμούς των λιπιδίων με τις πρωτεΐνες που κρατούν τα σύμπλοκα αυτά ενωμένα με την κυτταρική μεμβράνη. Ως εκ τούτου, σχηματίζεται ένα σύμπλοκο οργανικών διαλυτών-λιπιδίων, το οποίο αποσυνδέεται από την κυτταρική μεμβράνη και μεταφέρεται, μέσω διάχυσης, διαμέσου της κυτταρικής μεμβράνης και του στατικού υμένα του οργανικού διαλύτη, στη μάζα του οργανικού διαλύτη. Συμπερασματικά, ο συνδυασμός πολικών με μη-πολικούς οργανικούς διαλύτες οδηγεί στην εξαγωγή των ουδέτερων λιπιδίων που βρίσκονται ενωμένα με την κυτταρική μεμβράνη, αλλά και την εξαγωγή των πολικών λιπιδίων που βρίσκονται στο εσωτερικό του κυττάρου. Στην περίπτωση αυτή, μπορεί να ακολουθήσει διαχωρισμός των χρήσιμων λιπιδίων για την παραγωγή βιοντίζελ (ουδέτερα λιπίδια) από τα υπόλοιπα (πολικά λιπίδια), καθώς και των δύο διαφορετικών διαλυτών με διφασικό διαχωρισμό, ο οποίος επάγεται με προσθήκη μεγάλης ποσότητας μίγματος μη-πολικού διαλύτη και νερού, μετά την

απομάκρυνση της βιόμαζας των μικροφυκών με μηχανικά μέσα (π.χ. φιλτράρισμα). Η οργανική φάση αποτελείται από το μίγμα του μη-πολικού οργανικού διαλύτη με τον πολικό οργανικό διαλύτη και η υδατική φάση από το μίγμα του νερού με τον πολικό οργανικό διαλύτη. Ο διφασικός διαχωρισμός απομακρύνει την υδατική φάση, η οποία περιέχει πρωτεΐνες και υδατάνθρακες από την οργανική φάση η οποία αποδίδει, μέσω εξάτμισης του πολικού διαλύτη, τα αποξηραμένα λιπίδια τα οποία μετεστεροποιούνται, στη συνέχεια, προς παραγωγή μεθυλεστέρων (βιοντίζελ). [87]

Οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενοι οργανικοί διαλύτες είναι το χλωροφόρμιο και το εξάνιο σε συνδυασμό με τη μεθανόλη. Το μίγμα χλωροφόρμιο/εξάνιο (1:2 κ.ο.) είναι το πιο συχνά χρησιμοποιούμενο για την εξαγωγή των λιπιδίων σε βιομηχανική κλίμακα. Η συνύπαρξη του νερού, που έχει μείνει στα μικροφύκη, με αυτές τις δύο ενώσεις οδηγεί στον σχηματισμό τριαδικού μίγματος, το οποίο επιτρέπει την πλήρη εξαγωγή των ουδέτερων και των πολικών λιπιδίων. Η εξαγωγή σε αυτήν την περίπτωση είναι γρήγορη και αποδοτική, όμως το χλωροφόρμιο αποτελεί έναν έντονο τοξικό παράγοντα που μπορεί να επηρεάσει τις μετέπειτα χρήσεις των λιπιδίων αυτών. Εναλλακτικές επιλογές αποτελούν το διχλωροαιθάνιο, το οποίο, όμως, δεν έχει μεγάλη απόδοση στην εξαγωγή, και το εξάνιο. Το τελευταίο μπορεί να εισαχθεί ως μίγμα εξανίου/ισοπροπανόλης (3:2 κ.ο.), ενώ ο μηχανισμός λειτουργίας είναι παρόμοιος με αυτόν του μίγματος χλωροφορμίου/μεθανόλης, ο οποίος αναλύθηκε προηγουμένως. Πειραματικές μελέτες έδειξαν ότι το μίγμα του εξανίου/ισοπροπανόλης ήταν πιο επιλεκτικό στην εξαγωγή των ουδέτερων λιπιδίων από το μίγμα χλωροφορμίου/μεθανόλης. Μία πιθανή εξήγηση αποτελεί η αδυναμία του πρώτου να εξάγει τα πολικά λιπίδια που συνθέτουν την κυτταρική μεμβράνη των μικροφυκών. Όμως, η συνολική απόδοση της εξαγωγής ήταν πολύ χαμηλή σε πειράματα που έγιναν χρήσιμους του στελέχους *Botryococcus braunii*. Τέλος, η χρήση καθαρής αλκοόλης για την εξαγωγή των λιπιδίων δεν μπορεί να μην συνδυαστεί με μίξη της με μη-πολικό οργανικό διαλύτη, διότι, παρόλο που αυτή μπορεί να εξάγει τα λιπίδια που βρίσκονται συνδεδεμένα με την κυτταρική μεμβράνη, δεν μπορεί να εξάγει τα ουδέτερα λιπίδια που βρίσκονται ελεύθερα στο κυτταρόπλασμα. [87]

b. Πυρόλυση

Η πυρόλυση των μικροφυκών για την παραγωγή υγρού καύσιμου χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά το 1986 στη Γερμανία. Η πυρόλυση καθιστά μία διεργασία αποσύνθεσης της βιόμαζας κάτω από συνθήκες υψηλών θερμοκρασιών και έλλειψης οξυγόνου. Η διεργασία αυτή αρχικά χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή βιοαερίου από λιγνοκυτταρινική βιόμαζα (lingocellulose). Η πυρόλυση μπορεί να αποδειχθεί μία βιώσιμη τεχνική για την παραγωγή βιοαερίου από τα μικροφύκη, λόγω της υψηλής ποιότητας λιπιδίων που συλλέγονται και των χαμηλών απαιτούμενων θερμοκρασιών για την λειτουργία αυτής. Η πυρόλυση χωρίζεται σε δύο κατηγορίες, τη βραδεία, της οποίας κύριο προϊόν είναι το κάρβουνο και την ταχεία, της οποίας τα κύρια προϊόντα είναι έλαια και αέρια. Όμως, η τεχνική αυτή κρίνεται ασύμφορη αφού η αποσυντίθεται η βιόμαζα των μικροφυκών, οπότε δεν είναι πλέον δυνατή η διάθεση της και η επεξεργασία της προς μία πληθώρα εφαρμογών, όπως αυτή έχει αναλυθεί σε προηγούμενα κεφάλαια. [11]

c. Υγροποίηση

Η υγροποίηση αποτελεί μία τεχνική εξαγωγής λιπιδίων από υγρά μικροφύκη. Δηλαδή, μικροφύκη τα οποία δεν υποβλήθηκαν στο στάδιο της απονέρωσης, ή ξήρανσης. Πειραματικές μελέτες στις οποίες έγινε χρήση των στελεχών *Dunaliella tortiolecta* και *Botryococcus braunii* έδειξαν ότι η εξαγωγή των λιπιδίων μπορεί να επιτευχθεί ακόμη και σε υψηλά ποσοστά στα μικροφύκη (78.4% και 57-64% αντίστοιχα). Παρόλα αυτά, δεν μπορεί να θεωρηθεί βέβαιη η εφαρμογή της τεχνικής αυτής και σε βιομηχανική κλίμακα και με χρήση άλλων ειδών μικροφυκών όπως το είδος *Chlorella* που χρησιμοποιείται σε αυτήν τη μελέτη. [11]

iv. Μετεστεροποίηση

a. Εισαγωγή

Η διαδικασία της μετεστεροποίησης πραγματοποιείται με στόχο τη μείωση του ιξώδους των ελαίων του βιοντίζελ και την αύξηση της ρευστότητας αυτών, ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν από τους κινητήρες. Σε αυτό το στάδιο, μπορούν να εφαρμοστούν τεχνικές, οι οποίες ήδη χρησιμοποιούνται στην περίπτωση της μετατροπής σε βιοντίζελ των ελαίων που προέρχονται από τους φυτικούς οργανισμούς, λόγω της φυσικής και χημικής ομοιότητας αυτών με τα έλαια που εξάγονται από τα μικροφύκη. [11]

Στη μετεστεροποίηση, τον ρόλο του υποστρώματος έχουν οι αλκοόλες, εκ των οποίων, οι πιο συνήθεις σε αυτήν τη διεργασία είναι η μεθανόλη, αιθανόλη, η προπανόλη, η βουτανόλη, η πεντανόλη και η αμυλική αλκοόλη (amyl alcohol). Από αυτές συνήθως προτιμάται η μεθανόλη, λόγω του χαμηλού της κόστους και των φυσικών ιδιοτήτων της. Επίσης, στη μετεστεροποίηση είναι δυνατή η χρήση είτε αλκαλικού (π.χ. KOH, NaOH) είτε οξικού (π.χ. H₂SO₄) είτε ενζυμικού καταλύτη. Η χρήση οξέος αποδεικνύεται πιο χρήσιμη για τη μετατροπή των ελεύθερων λιπαρών οξέων (FFA), αλλά ο ρυθμός της αντίδρασης μετατροπής των τριγλυκεριδίων σε μεθυλεστέρες παραμένει σε χαμηλά επίπεδα. Τα αλκαλικά άλατα παρουσιάζουν υψηλότερους ρυθμούς αντίδρασης, έως και 4000 φορές, συγκριτικά με τα οξέα. Οπότε, η χρήση αλκαλικού καταλύτη συνηθίζεται στη βιομηχανία παραγωγής βιοντίζελ, στο στάδιο της μετεστεροποίησης. Παρόλα αυτά, υπάρχει πιθανότητα αντίδρασης των ελεύθερων λιπαρών οξέων (FFA) με τον αλκαλικό καταλύτη προς παραγωγή σάπωνος και νερού. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την απώλεια του καταλύτη κατά την αντίδραση, επομένως τη συνεχή τροφοδότηση της τελευταίας με καταλύτη ώστε να συνεχίζεται η λειτουργία της. Επίσης, τα ένζυμα παρουσιάζουν τα επιθυμητά αποτελέσματα κατά τη χρήση τους στη μετεστεροποίηση, αλλά το κόστος τους είναι υψηλό και υπάρχει πιθανότητα να μην είναι δυνατό να φτάσουν την έκταση της αντίδρασης που απαιτείται για την παραγωγή βιοντίζελ εντός των προδιαγραφών του διεθνούς οργανισμού ASTM. Η ακινητοποίηση των ενζύμων και η χρήση πολλαπλών ενζύμων αποτελούν μεθόδους οι οποίες μπορούν να βρουν πεδίο εφαρμογής στη μετεστεροποίηση στο μέλλον. Επιπρόσθετα, μελέτες υποδεικνύουν ότι το έλαιο με χημικό τύπο C₁₉H₃₆O₂ αποτελεί την πιο

άφθονη μορφή ελαίου μικροφύκους από όσα μετεστεροποιούνται, ενώ βρίσκεται σε συμφωνία με τα καθορισμένα πρότυπα για το βιοντίζελ. [16] [11][93]

b. Μελέτη της Αντίδρασης

Η αντίδραση της μετεστεροποίησης, όπως προαναφέρθηκε, είναι η αντίδραση τριγλυκεριδίου με αλκοόλη προς παραγωγή μεθυλεστέρα και γλυκερόλης, παρουσία καταλύτη. Πειραματικές μελέτες οδήγησαν στην εξαγωγή ορισμένων συμπερασμάτων για την αντίδραση. Πρώτον, περίσσεια αλκοόλης ίση με 1.6 φορές της στοιχειομετρικής απαιτείται ώστε να λάβει χώρα πλήρης αντίδραση μετεστεροποίησης. Επίσης, η απαιτούμενη ποσότητα της αλκοόλης μπορεί να μειωθεί με τη διεξαγωγή της αντίδρασης σε στάδια, όπου στην αρχή κάθε σταδίου θα προστίθεται ποσότητα αλκοόλης και καταλύτη, ενώ στο τέλος κάθε σταδίου θα απομακρύνεται γλυκερόλη με στόχο τη μετατόπιση της ισορροπίας της αντίδρασης. Η παρουσία νερού και ελεύθερων λιπαρών οξέων (FFA) αναστέλλουν τη διεξαγωγή της αντίδρασης και οι υψηλού μοριακού βάρους αλκοόλες είναι ευαίσθητες στην παρουσία νερού στο σύστημα. Επιπρόσθετα, τα ελεύθερα λιπαρά οξέα (FFA) μπορούν να μετατραπούν σε αλκυλεστέρες με τη βοήθεια οξικού καταλύτη, αντίδραση η οποία μπορεί να προηγηθεί της κύριας με αλκαλικό καταλύτη προς μετατροπή των τριγλυκεριδίων σε μεθυλεστέρες. Τέλος, οι οξικοί καταλύτες οδηγούν σε πιο αργή αντίδραση σε σύγκριση με τους αλκαλικούς καταλύτες. [16]

c. Ετερογενής Κατάλυση

Εκτός από την ομογενή κατάλυση η μετεστεροποίηση μπορεί να πραγματοποιηθεί και με ετερογενή κατάλυση είτε με αλκαλικό είτε με οξικό καταλύτη. Αντίθετα με την ομογενή κατάλυση, στην ετερογενή κατάλυση, ο καταλύτης μπορεί να ανακυκλώνεται στο σύστημα με στόχο την επαναχρησιμοποίησή του, μειώνοντας με αυτόν τον τρόπο το κόστος παραγωγής. Επίσης, ο καταλύτης διαχωρίζεται με σχετική ευκολία από το σύστημα μέσω φιλτραρίσματος, προς αποφυγή μόλυνσης του τελικού προϊόντος. Ο συνήθης καταλύτης που χρησιμοποιείται σε αυτήν την περίπτωση είναι το CaO ενισχυμένο με Al₂O₃. Κατά τη μετεστεροποίηση των λιπιδίων που προέρχονται από το είδος *Nannochloropsis*. Η έκταση της αντίδρασης στους 50 °C ήταν 97.5% με αναλογία μεθανόλης προς λιπίδια 30:1 και καταλύτη 2% κ.β. (ως προς το βάρος των λιπιδίων) και ο χρόνος της αντίδρασης είναι 4 ώρες. Ο μεγάλος απαιτούμενος χρόνος για την αντίδραση εξηγείται από το γεγονός ότι η ύπαρξη τριών διακριτών φάσεων (λιπίδια, αλκοόλη, καταλύτης) περιορίζει τη μεταφορά μάζας εντός του συστήματος. Η προσθήκη καταλύτη ο οποίος αποτελείται αμιγώς από CaO οδήγησε σε πολύ μικρή παραγωγή βιοντίζελ, ενώ η ενίσχυση του CaO με Al₂O₃ σε αναλογία 8:1 κ.β. παρουσίασε τα καλύτερα αποτελέσματα λόγω της αύξησης της πυκνότητας και του σθένους του καταλύτη. Επίσης, δοκιμές με χρήση άλλων ετερογενών καταλυτών όπως το Mg-Zr και οι ιεραρχικοί ζεόλιθοι, αλλά δεν παρουσίασαν τα επιθυμητά αποτελέσματα στις συνθήκες των πειραμάτων. [93] [94] [95]

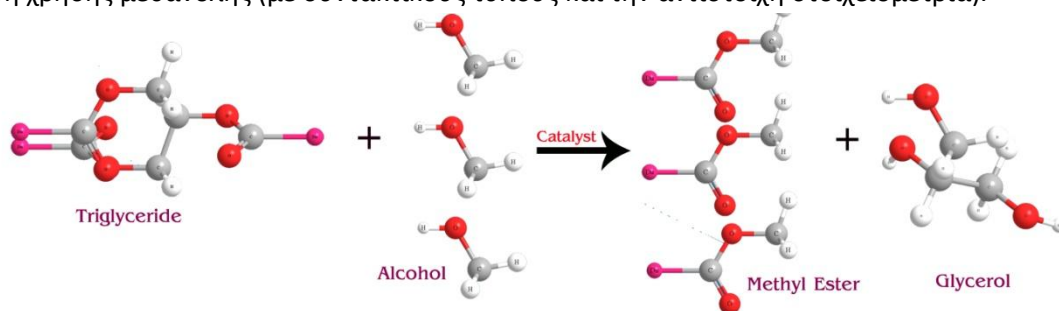
d. In-Situ Μετεστεροποίηση

Η συμβατική μέθοδος παραγωγής του βιοντίζελ αποτελείται από δύο ξεχωριστά βήματα, την εξαγωγή των λιπιδίων και τη μετεστεροποίηση. Η μέθοδος της in-situ μετεστεροποίησης απλοποιεί την διαδικασία παραγωγής βιοντίζελ, συμπύσσοντας τις δύο αυτές διεργασίες σε ένα βήμα, όπου τα λιπίδια που εξάγονται από τη βιόμαζα των μικροφυκών έρχονται σε άμεση επαφή με τον διαλύτη υπό την παρουσία καταλύτη. Ο διαλύτης αυτός έχει διττό ρόλο στο σύστημα. Πιο συγκεκριμένα, ο διαλύτης δρα ταυτόχρονα ως εξαγωγικό μέσο των λιπιδίων και ως αντιδρών για τη μετεστεροποίηση. Τα κύρια πλεονεκτήματα χρήσης της in-situ μετεστεροποίησης είναι η μείωση του βήματος του διαχωρισμού του καταλύτη από το σύστημα, η μείωση του χρόνου επεξεργασίας και η συνεπακόλουθη μείωση του κόστους παραγωγής. [93]

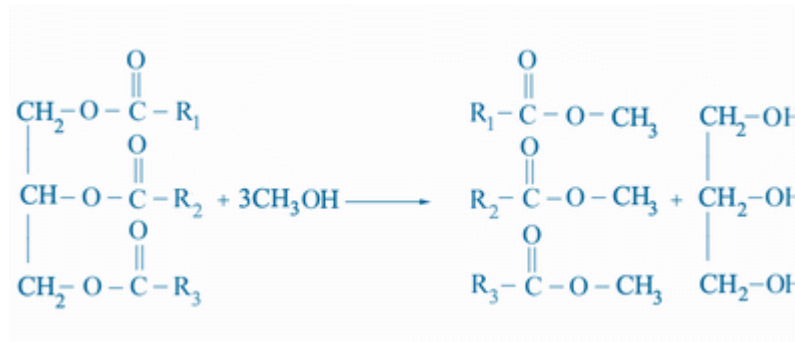
Πειραματικές μελέτες με χρήση του μικροφύκου *Chlorella* έδειξαν ότι επιτεύχθηκε η παραγωγή του βιοντίζελ σε ποσοστό 90%, στους 60 °C, με αναλογία μεθανόλης προς λιπίδια 315:1, παρουσία 0.04 mol H₂SO₄ και ο χρόνος της αντίδρασης ήταν 4 ώρες. Επίσης, είναι δυνατό να μειωθεί η κατανάλωση της μεθανόλης με χρήση συνδιαλύτη κατά την in-situ μετεστεροποίηση. Οι συνδιαλύτες που χρησιμοποιούνται στην περίπτωση αυτή είναι οι εξής: εξάνιο, τολουόλιο, χλωροφόρμιο και διχλωρομεθάνιο. [93]

Η απονέρωση των μικροφυκών είναι απαραίτητη ώστε να είναι αποτελεσματική η μέθοδος της in-situ μετεστεροποίησης. Παρουσία νερού σε ποσοστό μεγαλύτερο από 31.7% στα μικροφύκη, αναστέλλει πλήρως τη λειτουργία της μεθόδου με αποτέλεσμα την παραγωγή αμελητέων ποσοτήτων βιοντίζελ. Μία πιθανή αιτιολόγηση αυτού του φαινομένου έγκειται στην υδρόλυση των λιπιδίων, μία αντίδραση που δεν είναι επιθυμητή κατά τη μετεστεροποίηση. Σε αυτό το σημείο αξίζει να επισημανθεί το γεγονός ότι η μεθανόλη (ή η αιθανόλη) είναι διαλυτή στο νερό. Οπότε, το νερό που παράγεται στη διεργασία πρέπει να απομακρύνεται κατά την ανάκτηση του διαλύτη πριν την επαναχρησιμοποίηση του. [93]

Παρακάτω φαίνονται ο γενικός τύπος της χημική αντίδρασης της μετατροπής των λιπαρών οξέων σε μεθυλεστέρες καθώς και η αντίδραση της μετεστεροποίησης, στην περίπτωση χρήσης μεθανόλης (με συντακτικούς τύπους και την αντίστοιχη στοιχειομετρία).



Εικόνα III.7.2



Εικόνα III.7.3

Τέλος, στο παράρτημα (Σχήμα Π.2) παρουσιάζεται ένα τυπικό διάγραμμα παραγωγής βιοντίζελ από μικροφύκη με έμφαση στην εξαγωγή των λιπιδίων και την μετεστεροποίηση αυτών.

v. Μέθοδοι Συνδυασμού της Εξαγωγής των Λιπιδίων με τη Μετεστεροποίηση

Προσεγγίσεις οι οποίες αποφεύγουν την εξαγωγή λιπιδίων μέσω γενετικών τροποποιήσεων, ή εναλλακτικά, η επιλογή μικροφυκών τα οποία θα εκκρίνουν λιπίδια αναμένεται να έχουν αρκετά περιβαλλοντικά οφέλη. Ωστόσο, κρίνεται αναγκαία η μελέτη των απαιτήσεων σε υλικά και ενέργεια των προσεγγίσεων αυτών. [49]

Η προεπεξεργασία των συγκεντρωμένων μικροφυκών από την καλλιέργεια, όπως η ξήρανση ή η διάσπαση των κυττάρων, αποτελεί ένα επιπλέον στάδιο της παραγωγικής διαδικασίας, το οποίο προσφέρει σημαντική βοήθεια στη μετέπειτα εξαγωγή των λιπιδίων.

Η επεξεργασία με σογιέλαιο χρησιμοποιεί μία πρέσα με ένα τρυπάνι, το οποίο ανοίγει τα κύτταρα των μικροφυκών και ακολουθεί εξαγωγή του διαλύτη, με τη χρήση ανακυκλούμενου εξανίου. Έπειτα, λαμβάνει χώρα μετεστεροποίηση, η οποία μπορεί να προσαρμοστεί με ευκολία και στη διαδικασία της μετατροπής των μικροφυκών σε βιοντίζελ. [49]

a. Χρήση Υπερκρίσιμων Ρευστών

Η χρήση υπερκρίσιμων ρευστών, ειδικότερα υπερκρίσιμου CO₂ (Supercritical CO₂ – SCCO₂), για την εξαγωγή των λιπιδίων αποτελεί μια περιβαλλοντικά φιλική τεχνική, αφού αποφεύγει τη χρήση οργανικών διαλυτών. Επίσης, αυτή η μέθοδος παρέχει τη δυνατότητα της ασφαλέστερης επιλογής των εξαγωγίμων ελαίων, ώστε αυτά να είναι κατάλληλα για την μετατροπή τους σε βιοντίζελ. Τα πλεονεκτήματα χρήσης αυτής της μεθόδου δεν περιορίζονται μόνο στα προηγούμενα, αλλά επεκτείνονται στη χαμηλή τοξικότητα του διαλύτη, τους υψηλούς ρυθμούς μεταφοράς μάζας λόγω των χαρακτηριστικών της διάχυσης και το ιξώδες του διαλύτη, τα οποία βρίσκονται ανάμεσα στα αντίστοιχα των

υγρών και των αερίων, καθώς και την απουσία της ανάγκης διαχωρισμού του διαλύτη από τα λιπίδια μετά την εξαγωγή αυτών. Το κύριο μειονέκτημα της τεχνικής είναι το υψηλό κόστος εξοπλισμού και λειτουργίας. [49] [89] [87]

Οι βέλτιστες συνθήκες υπολογίζονται, μέσω θερμοδυναμικών εξισώσεων, σε 100 °C και 30 MPa χρησιμοποιώντας την υπόθεση μηδενικών απωλειών ενέργειας σε βιομηχανική κλίμακα. Πειραματικές μελέτες έδειξαν ότι η αύξηση της πίεσης οδηγεί σε αύξηση της απόδοσης, κάτι το οποίο δεν συμβαίνει στην περίπτωση αύξησης της θερμοκρασίας. Παρόλα αυτά, οι μεταβολές της απόδοσης της εξαγωγής των λιπιδίων με αλλαγές στις συνθήκες της διεργασίας δεν θεωρούνται σημαντικές. [49] [89]

b. Άλλες Μέθοδοι

Ακόμη μία εξεταζόμενη περίπτωση είναι αυτή της άμεσης μετεστεροποίησης. Η τελευταία λαμβάνει χώρα με την άμεση τροφοδότηση των ξηραμένων κυττάρων με μεθανόλη και ταυτόχρονη χρήση θεικού οξέος ως καταλύτη.

Τέλος, η χρήση υπερκρίσιμης μεθανόλης προσφέρει τον συνδυασμό της εξαγωγής των λιπιδίων με τη μετεστεροποίηση των ελαίων που προέρχονται από υγρά φύκια. Αυτή η μέθοδος αποτελεί μια περισσότερο καθαρή και ταυτόχρονα ισχυρά εκλεκτική διεργασία συγκριτικά με τις συμβατικές διεργασίες, οι οποίες δεν απαιτούν καταλύτη και παράγουν λιγότερα απόβλητα. Παρόλα αυτά, υπάρχουν σχετικά μεγάλες ενεργειακές απαιτήσεις από τη διεργασία, γεγονός το οποίο οφείλεται στην υψηλή θερμοκρασία της αντίδρασης (περίπου 250 °C), την απαίτηση αντλητικού συστήματος για τη μεταφορά ρευστών σε πιέσεις πέρα από την κρίσιμη και την ανάκτηση της μεθανόλης. Τέλος, παρότι αυτή η μέθοδος έχει υψηλές ενεργειακές απαιτήσεις, η αποφυγή της ξήρανσης και ο συνδυασμός της εξαγωγής των λιπιδίων με τη διαδικασία της μετατροπής των μικροφυκών σε βιοντίζελ μπορούν να αποτελέσουν καταλυτικά πλεονεκτήματα για την επιλογή της μεθόδου για την παραγωγή του βιοντίζελ από μικροφύκη. [49]

8. Διάθεση & Ανακύκλωση του Υπόλειμματος της Βιόμαζας των Μικροφυκών

i. Εισαγωγή

Η χρήση της βιόμαζας η οποία αποτελεί υπόλειμμα της διεργασίας εξαγωγής των λιπιδίων επηρεάζει ισχυρά τα ισοζύγια μάζας και ενέργειας των πρώτων υλών καθώς και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις της συνολικής διαδικασίας παραγωγής. Πιο αναλυτικά, η ανακύκλωση ενός ποσοστού της βιόμαζας αυτής στα ρεύματα τροφοδοσίας της διεργασίας παραγωγής αποτελεί την πλέον συνηθισμένη τακτική. Αυτό δικαιολογείται διότι με αυτόν τον τρόπο μειώνεται η ανάγκη χρήσης θρεπτικών συστατικών στην τροφοδοσία. Επιπρόσθετα, η αξιοποίηση αυτής της βιόμαζας για την παραγωγή διαφόρων βιολογικών προϊόντων αυξάνει τη βιωσιμότητα της μονάδας σε οικονομικό επίπεδο για μακρόχρονη λειτουργία. Η αξία της γλυκερόλης από τη μετεστεροποίηση αυξάνεται με την εφαρμογή αυτής της λογικής. Παρόλα αυτά, οι σκέψεις αυτές βρίσκονται σε θεωρητικό επίπεδο και δεν είναι σίγουρη η βιωσιμότητα αυτής της πρακτικής. [49]

Οι πλέον συνήθεις διεργασίες μετεπεξεργασίας του υπόλοιπου της βιόμαζας είναι η αναερόβια χώνευση (ή η αεριοποίηση), η παραγωγή ενέργειας (μέσω άμεσης καύσης), η διάθεση της προς άλλες χρήσεις, όπως για παράδειγμα ζωοτροφές, χρωστικές και πρόσθετα τροφίμων, ανάλογα με το είδος του μικροφύκου από το οποίο προέρχεται, όπως οι χρήσεις αυτές αναλύθηκαν στα πρώτα κεφάλαια της συγκεκριμένης μελέτης και τέλος η υγειονομική ταφή, η οποία δεν είναι επιθυμητή διότι η βιόμαζα σε αυτήν την περίπτωση μένει ανεκμετάλλευτη, κάτι το οποίο δεν συμβαίνει στις υπόλοιπες επιλογές.

ii. Αναερόβια Χώνευση

Η αναερόβια χώνευση παρουσιάζει το πλεονέκτημα της ανακύκλωσης ενέργειας, μέσω της παραγωγής βιοαερίου (αέριο πλούσιο σε CH_4) και θρεπτικών συστατικών (άζωτο και φώσφορος) στο σύστημα. Οι εκτιμήσεις της ποσότητας του μεθανίου προέρχονται από τις αντίστοιχες εκτιμήσεις για το περιεχόμενο της βιόμαζας που απομένει σε πρωτεΐνες, υδατάνθρακες και recalcitrant. Τα ποσοστά αυτά ανέρχονται σε 52%, 25% και 23% αντίστοιχα. Επιπρόσθετα, χρησιμοποιείται η παραδοχή ότι η χώνευση λαμβάνει χώρα σε 40 °C και ο υδραυλικός χρόνος παραμονής (Hydraulic Retention Time – HRT) αντιστοιχεί σε 10 ημέρες. Γενικότερα, όσον αφορά στον υδραυλικό χρόνο παραμονής των μικροφυκών στον χωνευτήρα, εκείνος έχει σημαντική επιρροή στην απόδοση της αναερόβιας χώνευσης, ενώ αύξηση του οδηγεί σε αύξηση της απόδοσης της διεργασίας. Πιο συγκεκριμένα, για την αποτελεσματική λειτουργία της διεργασίας της αναερόβιας χώνευσης απαιτούνται υδραυλικοί χρόνοι παραμονής μεγαλύτεροι των 5 ημερών. [49] [90] [96] [97]

Ορισμένα προβλήματα στο σύστημα είναι πιθανό να δημιουργηθούν από το άζωτο, το οποίο σχετίζεται με το υψηλό πρωτεϊνικό περιεχόμενο των πρώτων υλών, όπως για παράδειγμα ο σχηματισμός αμμωνίας στον χωνευτήρα, η οποία αναστέλλει την ανάπτυξη των αναερόβιων βακτηρίων. Το πρόβλημα αυτό παρουσιάζεται σε υψηλές συγκεντρώσεις

απελευθερωμένου αζώτου, υπό τη μορφή της αμμωνίας, και επιδεινώνεται στην περίπτωση αύξησης στο pH. Το συγκεκριμένο πρόβλημα είναι δυνατό να αντιμετωπιστεί με τη χρήση βακτηρίων ανθεκτικών στην αμμωνία, με προσθήκη υποστρώματος φτωχού σε αμμωνία ή με την επιλογή είδους μικροφυκών, για τη συνολική παραγωγική διαδικασία, με υψηλή αναλογία C/N και πρόκληση συνθηκών μεγιστοποίησης της αναλογίας αυτής. Τέλος, στην περίπτωση χρήσης θαλασσινών φυκών, το νάτριο είναι εκείνο που αναστέλλει την ανάπτυξη αυτών και αντιμετωπίζεται με παρόμοιο τρόπο. [49] [90] [96]

Άλλος ένας παράγοντας που δύναται να αυξήσει την απόδοση της αναερόβιας χώνευσης είναι η προσθήκη της γλυκερίνης που παράγεται κατά το στάδιο της μετεστεροποίησης. Πειραματικές μελέτες έδειξαν ότι αύξηση της αναλογίας αυτής στην τιμή 12.44 με χώνευση των μικροφυκών παρουσία γλυκερίνης, οδήγησε σε αύξηση της παραγωγής CH₄ μεγαλύτερη από 50% αυτής που επιτεύχθηκε με χώνευση μόνο του υπολείμματος της βιόμαζας των μικροφυκών. Τέλος, η συγκέντρωση στην οποία εισάγεται το υπόστρωμα αποτελεί έναν ακόμη παράγοντα που επηρεάζει την απόδοση της αναερόβιας χώνευσης. [97]

Η έξοδος του αντιδραστήρα υπολογίζεται ότι αντιστοιχεί σε 0,1 kg (0,08 m³) μεθανίου ανά kg υπολείμματος βιόμαζας μικροφυκών. Επίσης, το μεθάνιο παράγει ηλεκτρική ενέργεια μέσω της καύσης του σε αεριοστρόβιλο, η οποία χρησιμοποιείται εσωτερικά σε διεργασίες του συστήματος χωρίς να υπάρχει πλεόνασμα το οποίο μπορεί να πωληθεί στο δίκτυο. Το ποσοστό των υπολειμμάτων των θρεπτικών συστατικών που ανακυκλώνονται στο σύστημα εκτιμάται ότι είναι 70%. Επίσης, στην περίπτωση που το λιπιδιακό περιεχόμενο των μικροφυκών δεν ξεπερνά το 40%, η αναερόβια χώνευση αποτελεί τη βέλτιστη ενεργειακή επιλογή για την δυναμική ανάκτηση της βιόμαζας. [49] [90] [96]

Τέλος, το πάγιο κόστος της μονάδας αναερόβιας χώνευσης εξαρτάται από την παραγωγικότητα των μικροφυκών, οπότε και τον όγκο που θα καταλαμβάνει, τελικά η μονάδα αναερόβιας χώνευσης. Από την άλλη πλευρά, σε αντίθεση με τον αναερόβιο χωνευτήρα, το πάγιο κόστος της μονάδας παραγωγής ηλεκτρισμού και θέρμανσης εξαρτάται από το ύψος της παραγωγής βιοαερίου.

9. Φορολογία Καυσίμων στην Ε.Ε.

i. Φόρος Άνθρακα

Ο φόρος άνθρακα επιβάλλεται σήμερα σε αρκετές χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης καθώς και στη Νέα Ζηλανδία, ενώ η Ινδία έχει επιβάλλει φόρο μόνο στο λιθάνθρακα. Σχέδια για φόρο άνθρακα προωθούν τώρα η Ε.Ε. και αρκετές ακόμα χώρες. [98] [99]

Πιο αναλυτικά, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή έχει παρουσιάσει μία πρότασή για την αναμόρφωση των παρωχημένων κανόνων σχετικά με τη φορολογία των ενεργειακών προϊόντων στην Ευρωπαϊκή Ένωση. Στόχος των νέων κανόνων είναι η αναδιάρθρωση του τρόπου φορολογίας των ενεργειακών προϊόντων, η άρση των σημερινών ανισοτήτων και ο συνυπολογισμός των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) στο ενεργειακό περιεχόμενο. Οι υφιστάμενοι ενεργειακοί φόροι θα αποτελούνται από δύο μέρη, με τη συνεκτίμηση των οποίων θα προσδιορίζεται ο συνολικός φορολογικός συντελεστής του προϊόντος. Η Επιτροπή θέλει να προωθήσει την ενεργειακή αποδοτικότητα και την κατανάλωση φιλικότερων προς το περιβάλλον προϊόντων, καθώς και να αποτρέψει τις στρεβλώσεις του ανταγωνισμού στην ενιαία αγορά. Η πρόταση θα βοηθήσει τα κράτη μέλη στον ανασχεδιασμό της συνολικής φορολογικής αρχιτεκτονικής τους με τρόπο που να συμβάλλει στην ανάπτυξη και την απασχόληση, δεδομένου ότι η φορολόγηση θα στρέφεται από την εργασία στην κατανάλωση. [100]

ii. Η φορολογία στην Ενέργεια για κράτη της Ε.Ε.

a. Ισχύουσες Διατάξεις

Οι φόροι σε θέματα ενέργειας δεν αποτελούν μία νέα κατηγορία φόρων για τα κράτη της Ε.Ε., αφού η συγκεκριμένη διάταξη εφαρμόζεται από το 2003. Η συγκεκριμένη διάταξη δημιουργήθηκε προς αποφυγή περιπτώσεων αθέμιτου ανταγωνισμού στον ενεργειακό τομέα της, εκάστοτε, εγχώριας αγοράς. Ειδικότερα, η διάταξη αυτή καθορίζει τις περιπτώσεις όπου πρέπει να εφαρμοστεί η φορολογία, αλλά και τις εξαιρέσεις στον ενεργειακό τομέα. Η Ε.Ε. καθορίζει το ελάχιστο ποσό φόρου για ορισμένες κατηγορίες, όπως προϊόντα θέρμανσης, ηλεκτρισμού και καυσίμων, όμως κάθε κράτος-μέλος δύναται να αυξήσει τους φόρους αυτούς, όπως αυτό κρίνει. [101]

b. Πρόσφατες Τροποποιήσεις

Παρόλα αυτά, η διάταξη του 2003 για την ενεργειακή φορολόγηση στην Ε.Ε., κρίνεται αναγκαίας τροποποίησης ή και πλήρους αντικατάστασης, αφού δεν συνάδει με τις πρόσφατες προσδοκίες της Ε.Ε. για την ενισχυμένη προστασία του περιβάλλοντος και της κλιματικής αλλαγής. Επίσης, στόχος της εφαρμογής του νέου φορολογικού πλαισίου είναι η αντιμετώπιση προβλημάτων τα οποία ανέκυψαν από το 2003 μέχρι σήμερα. Τέλος, η

ισχύουσα διάταξη δεν συνάδει με την πολιτική της Ε.Ε. για ανταλλαγή επιτρεπόμενων ορίων εκπομπών ρύπων (Emissions Trading System - ETS) με το οποίο οι βιομηχανίες μπορούν είτε να αγοράζουν είτε να πωλούν όρια εντός του συστήματος στο οποίο βρίσκονται. [101]

Με την αναθεωρημένη οδηγία για την ενεργειακή φορολογία τα κράτη μέλη θα είναι σε θέση να κάνουν χρήση της φορολογίας με τον καλύτερο δυνατό τρόπο και, επομένως, να στηρίξουν τελικά τη βιώσιμη ανάπτυξη. [101]

c. Όρια για Καύσιμα

Τα όρια αυτά θέτονται, για ιστορικούς λόγους, σε μορφή ογκομετρικών παροχών (€/1000L), οπότε δεν μπορεί να γίνει δίκαια κατανομή όλων των ρύπων με αυτό το σύστημα. Πιο συγκεκριμένα, με τα υπάρχοντα όρια, στην περίπτωση των καυσίμων, ο άνθρακας (κάρβουνο) έχει τη μικρότερη τιμή φορολόγησης, ενώ η αιθανόλη την υψηλότερη. Επίσης, τα ανανεώσιμα καύσιμα φορολογούνται στην ίδια βάση με εκείνα τα οποία έχουν ως στόχο να αντικαταστήσουν. Χαρακτηριστικό παράδειγμα της τελευταίας πρότασης αποτελεί το βιοντίζελ, η παραγωγή του οποίου εξετάζεται και στη συγκεκριμένη μελέτη, σε σύγκριση με το συμβατικό ντίζελ. Οπότε, καύσιμα με μικρότερο ενεργειακό περιεχόμενο, όπως τα προερχόμενα από ανανεώσιμες πηγές, αντιμετωπίζουν υψηλότερη φορολογία σε σύγκριση με τα ανταγωνιστικά τους, συμβατικά καύσιμα. [101]

d. Όρια για το CO₂

Στην ισχύουσα μορφή της διάταξης για τη φορολογία στην Ε.Ε. δεν αναφέρεται η ανάγκη μείωσης των εκπομπών του CO₂. Γεγονός αποτελεί η ευνοϊκότερη φορολόγηση ορισμένων καυσίμων συγκριτικά με ανταγωνιστές τους, οι οποίοι είναι καθαρότεροι προς το περιβάλλον. [101]

Πρωταρχικός στόχος του νέου πλαισίου φορολόγησης στην ενέργεια είναι η στροφή της Ε.Ε. προς μια ενεργειακά αποδοτική οικονομία με χαμηλές εκπομπές ενώσεων του άνθρακα με ταυτόχρονα αυξημένη ανταγωνιστικότητα στην εσωτερική αγορά. Οπότε, η Ε.Ε. προσανατολίζει τις αλλαγές αυτές με γνώμονα τομείς όπως η κλιματική αλλαγή, η ενεργειακή απόδοση, η εσωτερική αγορά, η ανάπτυξη και η καταπολέμηση της ανεργίας. [101]

Όσον αφορά στο θέμα της κλιματικής αλλαγής, θα τεθεί μία τιμή φορολογίας για τις εκπομπές CO₂ σε επιχειρήσεις οι οποίες βρίσκονται εκτός αυτών που βρίσκονται στο ETS. Πιο συγκεκριμένα, όσο λιγότερες είναι οι εκπομπές CO₂, τόσο μικρότερος θα είναι και ο φόρος στην επιχείρηση, κάτι το οποίο δίνει κίνητρο για μειωμένες εκπομπές CO₂ εντός Ε.Ε. [101]

Πιο αναλυτικά, θα τεθεί φόρος ύψους 20 €/t CO₂ για όλους τους τομείς οι οποίοι δεν καλύπτονται από το ETS. Ωστόσο, οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας δεν θα υπόκεινται στην ανωτέρω φορολογία. Επίσης, η φορολογία για όλα τα κράτη-μέλη της Ε.Ε. διευκολύνει τις βιομηχανίες οι οποίες λειτουργούν σε διάφορα κράτη-μέλη, με διαφορετικούς φόρους για τις εκπομπές CO₂ στο καθένα, αποφεύγοντας τη γραφειοκρατία και τους περίπλοκους

περιβαλλοντικούς νόμους κάθε κράτους-μέλους με τη χρήση κοινού φορολογικού πλαισίου της Ε.Ε. για περιβαλλοντικά θέματα. [101]

Στην περίπτωση της ενεργειακής απόδοσης, στόχος είναι η σύνδεση του ύψους του φόρου με το ενεργειακό περιεχόμενο του καυσίμου, κάτι το οποίο θα προσανατολίσει τις επιχειρήσεις σε περισσότερες ενεργειακά αποδοτικές διεργασίες για την παραγωγή ενός προϊόντος. [101]

e. Όρια για την Ενέργεια

Η φορολογία των ενεργειακών προϊόντων είναι εν μέρει εναρμονισμένη σε επίπεδο ΕΕ. Η οδηγία για την ενεργειακή φορολογία καθορίζει ελάχιστους συντελεστές φορολογίας των ενεργειακών προϊόντων που χρησιμοποιούνται ως καύσιμα κίνησης και ως καύσιμα θέρμανσης καθώς και της ηλεκτρικής ενέργειας. Ωστόσο, η οδηγία είναι παρωχημένη και αντιφατική. Μια φορολογία βασιζόμενη σε όγκους καταναλισκόμενων ενεργειακών προϊόντων δεν μπορεί να επιτύχει τους στόχους της ΕΕ για την ενέργεια και την κλιματική αλλαγή. Επιπλέον δεν δημιουργεί οικονομικά κίνητρα για την ενίσχυση της ανάπτυξης και την τόνωση της δημιουργίας θέσεων εργασίας. Η φορολόγηση των ενεργειακών προϊόντων πρέπει να συνεκτιμά καλύτερα το ενεργειακό περιεχόμενό τους και τον αντίκτυπό τους στο περιβάλλον. [101]

Τα παραπάνω οδηγούν την Ε.Ε. σε θέσπιση νέου φορολογικού πλαισίου το οποίο θα περιλαμβάνει μία ελάχιστη τιμή βασισμένη στο ενεργειακό περιεχόμενο ενός καυσίμου (€/GJ), αντί του όγκου που χρησιμοποιείται παλαιότερα. Αυτό σημαίνει ότι ένα καύσιμο θα φορολογείται βάσει του ποσού ενέργειας που αποδίδει, οπότε με αυτόν τον τρόπο επιβραβεύεται η υψηλότερη ενεργειακή απόδοση ενός καυσίμου σε σύγκριση με άλλα ανταγωνιστικά αυτού καύσιμα. Πιο αναλυτικά, ο ελάχιστος φορολογικός συντελεστής καθορίζεται σε 9.6 €/GJ για τα καύσιμα κίνησης και σε 0.15 €/GJ για τα καύσιμα θέρμανσης. Αυτό θα ισχύει για όλα τα καύσιμα που χρησιμοποιούνται στις μεταφορές και για θέρμανση. [101]

Η τροπολογία αυτή αποτελεί ένα πιο δίκαιο μέτρο φορολόγησης, διότι έχει ως γνώμονα το ποσό ενέργειας το οποίο παράγεται με τη χρήση ποσότητας καυσίμου παρά στην ποσότητα αυτού. Η μονάδα GJ θα φορολογείται στην ίδια βάση ανεξάρτητα από το προϊόν που την παράγει. [101]

Επίσης, η μεγάλη μεταβατική περίοδος για την πλήρη συμμόρφωση των επιχειρήσεων με τη φορολογία στην ενέργεια, έως το 2023, αφήνει ένα μεγάλο περιθώριο στις βιομηχανίες αυτές να τροποποιήσουν, ή προτιμότερα να βελτιώσουν, τη λειτουργία τους ώστε να προσαρμοστούν στα νέα δεδομένα. [101]

Στα καύσιμα τα οποία χρησιμοποιούνται για θέρμανση όπως ο άνθρακας (coal) θα ακολουθείται ίδιας τάξης φορολογία για την ενέργεια και το CO₂ ταυτόχρονα, οπότε καύσιμα με υψηλό ενεργειακό περιεχόμενο αλλά και αρκετές εκπομπές CO₂ θα υπόκεινται σε αυξημένη φορολόγηση. [101]

Ακόμη, αξίζει να σημειωθεί ότι τα βιοκαύσιμα, το LPG (Liquefied Petroleum Gas) και το CNG (Compressed Natural Gas) εξαιρούνται μέχρι στιγμής από την εν λόγω φορολόγηση, στην περίπτωση που αυτό επιτρέπεται από το ισοζύγιο CO₂. Αυτή η εξαίρεση θα ισχύσει έως το 2033, εκτός αν οι συνθήκες το επιβάλλουν συντομότερα. [101]

Επιπρόσθετα, οι κοινωνικές πτυχές λαμβάνονται υπόψη εφόσον παρέχεται στα κράτη μέλη η δυνατότητα να απαλλάσσουν πλήρως την ηλεκτρική ενέργεια την οποία καταναλίσκουν τα νοικοκυριά για θέρμανση, ανεξαρτήτως του χρησιμοποιούμενου ενεργειακού προϊόντος. [101]

Τέλος, η τροπολογία αυτή θα έρθει σε ισχύ από φέτος (2013) παράλληλα με την Τρίτη φάση του σχεδίου ETS. Η πλήρης ισχύς του φορολογικού πλαισίου θα εφαρμοστεί το 2023, ώστε να προλάβουν οι επιχειρήσεις που δραστηριοποιούνται εντός Ε.Ε. να προσαρμοστούν προς αυτή. [101]

Στη συνέχεια παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα οφέλη της αναθεώρησης της τροπολογίας για τη φορολόγηση της ενέργειας εντός της Ευρωπαϊκής Ένωσης. [101]

f. Τα οφέλη της νέας τροπολογίας για τη φορολόγηση της ενέργειας στην Ε.Ε.

Με την καινούργια τροπολογία καθίσταται ευνοϊκή η χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και η κατανάλωση των πηγών ενέργειας που εκπέμπουν λιγότερο CO₂. Σήμερα συμβαίνει το παράδοξο να φορολογούνται λιγότερο οι πιο ρυπογόνες πηγές ενέργειας. Αντιθέτως, τα βιοκαύσιμα είναι από τις πλέον βαριά φορολογούμενες πηγές ενέργειας, παρά τη δέσμευση της Ε.Ε. για αύξηση του μεριδίου των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στις μεταφορές. Με τη νέα πρόταση αίρονται οι αντιφάσεις αυτές. [101]

Ακόμη εξετάζεται μια πιο συνεκτική προσέγγιση για την ενεργειακή φορολογία σε ολόκληρη την Ε.Ε. εμποδίζοντας την ύπαρξη πληθώρας εθνικών πολιτικών και συμβάλλει στη δημιουργία ισότιμων όρων ανταγωνισμού για τη βιομηχανία εντός της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Προσφέρει επίσης στα κράτη μέλη την ευκαιρία να ανασχεδιάσουν τις φορολογικές τους πολιτικές έτσι ώστε αυτές να συμβάλουν στην προώθηση των θέσεων εργασίας και της απασχόλησης. [101]

Στον τομέα της κλιματικής αλλαγής και της ρύπανσης της ατμόσφαιρας από αέρια του θερμοκηπίου, στόχος της αναθεωρημένης οδηγίας είναι να συμπληρώσει το ισχύον Σύστημα Εμπορίας Εκπομπών της Ε.Ε., με την επιβολή φόρου στο διοξείδιο του άνθρακα σε τομείς εκτός του πεδίου εφαρμογής του (μεταφορές, νοικοκυριά, γεωργία και μικρές βιομηχανίες). Οι τομείς αυτοί αντιπροσωπεύουν το ήμισυ των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα της Ε.Ε., συνεπώς, είναι ιδιαίτερα σημαντικό το κίνητρο για μείωση των εκπομπών αυτών μέσω της τιμής του εκπεμπόμενου CO₂. [101]

Τέλος, η τροπολογία αυτή οδηγεί την Ε.Ε. πιο κοντά στην επίτευξη των στόχων της για την ενέργεια και την κλιματική αλλαγή, σύμφωνα με τις απαιτήσεις που διατυπώνονται στα συμπεράσματα του Ευρωπαϊκού Συμβουλίου του Μαρτίου 2008. Αντανακλά επίσης τα αποτελέσματα της διάσκεψης των Ηνωμένων Εθνών για την κλιματική αλλαγή, η οποία πραγματοποιήθηκε στο Κανκούν τον Δεκέμβριο του 2010. [101]

IV. ΜΕΛΕΤΕΣ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΩΝ

1. Εισαγωγή

Σε αυτό το κομμάτι της εργασίας μελετώνται ορισμένες περιπτώσεις μονάδων σε διάφορες περιοχές της Ελλάδας. Οι περιοχές αυτές επιλέχθηκαν βάσει των εξής κριτηρίων: (1) ύπαρξη μονάδας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας για δέσμευση του εκπεμπόμενου CO₂ από αυτήν, (2) ύπαρξη μονάδας επεξεργασίας αστικών λυμάτων για την τροφοδότηση της μονάδας με θρεπτικά συστατικά από την απορροή της εν λόγω μονάδας, (3) ύπαρξη πηγής νερού (για χρήση μεγάλων ποσοτήτων) σε κοντινή απόσταση (π.χ. θάλασσα, λίμνη, ποταμός), (4) έντονη ηλιοφάνεια στην περιοχή, (5) ύπαρξη απαιτούμενης έκτασης για την εγκατάσταση της μονάδας στην περιοχή.

Παρόλα αυτά, είναι πολύ δύσκολη η συνύπαρξη όλων των κριτηρίων στις περιοχές της Ελλάδας, οπότε αυτά κατατάσσονται κατά φθίνουσα πορεία σημασίας. Πιο συγκεκριμένα, το πρώτο κριτήριο είναι το πιο σημαντικό από όλα τα υπόλοιπα, αφού παρουσιάζει σημαντικό όφελος, τόσο οικονομικό όσο και περιβαλλοντικό.

Ως αποτέλεσμα, οι τοποθεσίες που επιλέγονται προς διερεύνηση για την εγκατάσταση και τη λειτουργία της μονάδας, καθώς και τη βιωσιμότητα αυτής είναι: η Πτολεμαΐδα (πολύ υψηλή παραγωγή CO₂), η Μεγαλόπολη (υψηλή παραγωγή CO₂), το Κερατσίνι (μέση παραγωγή CO₂), η Σάμος (χαμηλή παραγωγή CO₂) και η Μήλος (πολύ χαμηλή παραγωγή CO₂).

Επιπρόσθετα, η επιλογή των τοποθεσιών αυτών καλύπτει ένα μεγάλο γεωγραφικό εύρος περιοχών της Ελλάδας με ανόμοιες εκτάσεις και διαφορετικούς πληθυσμούς σε κάθε περίπτωση. Παρόλα αυτά, στις περιπτώσεις της Πτολεμαΐδας και της Μεγαλόπολης δεν ικανοποιείται επαρκώς το 3^ο κριτήριο, περί ύπαρξης πηγής νερού σε κοντινή απόσταση, οπότε περαιτέρω διερεύνηση χρειάζεται η παροχή του νερού της θάλασσας στη μονάδα. Αν αυτό δεν είναι τεχνικοοικονομικά εφικτό, τότε θα πρέπει να συνυπολογιστεί και το κόστος του νερού, όπως αυτό φαίνεται στα αντίστοιχα αποτελέσματα των δύο αυτών σεναρίων στο παράρτημα (Πίνακες Π.9, Π.10).

2. Δεδομένα και Παραδοχές για την Τεχνικοοικονομική Μελέτη

Στη συνέχεια παρουσιάζονται ορισμένα από τα βιβλιογραφικά δεδομένα και τις απαραίτητες παραδοχές που έγιναν για την πραγματοποίηση της τεχνικοοικονομικής μελέτης σε καθεμία από τις μονάδες παραγωγής.

Η πλήρης λίστα δεδομένων και παραδοχών βρίσκεται στο παράρτημα (Πίνακες Π.9, Π.10) της παρούσας εργασίας.

i. Ανοικτή Λίμνη

Πρώτες Ύλες / Αρχικές Ροές				
Ιδιότητα	Μονάδες	base	projected	Πηγή
Δέσμευση CO ₂	kg CO ₂ /kg βιόμαζας	1.83	1.83	AquaFUELS [102]
Απόδοση Δέσμευσης CO ₂	%	20	20	Παραδοχή (AquaFUELS)
Χαρακτηριστικά Μικροφυκών				
Ιδιότητα	Μονάδες	base	projected	Πηγή
Παραγωγικότητα α Βιόμαζας Μικροφυκών	kg/m ² /έτος	3	6.6	AquaFUELS
Λιπιδιακό Περιεχόμενο	% κ.β. ξηρής βιόμαζας μικροφυκών	30	50	Mata et al. (2010) [2]
Παραγωγή Ελαίου	m ³ ελαίου/στρέμμα /έτος	5.87	9.78	Mata et al. (2010) [2]
Χαρακτηριστικά Αντιδραστήρα & Μονάδας				
Ιδιότητα	Μονάδες	base	projected	Πηγή
Εξάτμιση Νερού	L/m ² /ημέρα	10	10	Παραδοχή (AquaFUELS)
Ρυθμός Αραιώσης	1/ημέρες	0.02	0.25	Παραδοχή (AquaFUELS & Christi)
Συγκέντρωση Κυττάρων	kg/m ³	0.14	0.5	Christi (2007) [68] & Davis (2011) [66]
Λόγος V/S (όγκος/επιφάνεια)	m ³ /m ²	0.25	0.25	AquaFUELS
Συνολική Κατανάλωση Ηλεκτρισμού	kWh/kg παραγόμενης βιόμαζας μικροφυκών	0.715	0.715	Richardson et al. (2010) [103]
Κόστος Αντιδραστήρα	€/στρέμμα	14300.00	8000.00	AquaFUELS
Ετήσια Λειτουργία	Ημέρες	300	330	Παραδοχή (AquaFUELS)
Χαρακτηριστικά Βιοντίζελ				
Ιδιότητα	Μονάδες	base	projected	Πηγή
Παραγωγή Βιοντίζελ ανά μονάδα εδάφους	kg/m ² /έτος	5.1927	8.6515	Mata et al. (2010) [2]
Ενεργειακό Περιεχόμενο	MJ/kg	37.2	37.8	Khoo et al. (2011) [104]

Βιοντίζελ				
Έσοδα από Βιοντίζελ	€/kg	0.40	0.50	Παραδοχή
Αναερόβια Χώνευση - Παραγωγή Βιοαερίου & Ηλεκτρισμού				
Ιδιότητα	Μονάδες	base	projected	Πηγή
Συνολικό Πάγιο Κόστος Συστήματος Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας	€/στρέμμα MWh/τόνο πτητικών στερεών	5465.5 7.3959	4815.7 8.9	Zamalloa et al. (2011) [105] Sialve et al. (2009) [96]
Περιβαλλοντική Αποτίμηση Λειτουργίας Μονάδας				
Ιδιότητα	Μονάδες	base	projected	Πηγή
Εκπομπές CO ₂ από τη λειτουργία της μονάδας	τόνοι CO ₂ /τόνοι βιοντίζελ	15.46	0.35	Lam et al. (2012) [106]

Πίνακας IV.2.1

ii. Φωτοβιοαντιδραστήρας (PBR)

Πρώτες Ύλες / Αρχικές Ροές				
Ιδιότητα	Μονάδες	base	projected	Πηγή
Δέσμευση CO ₂	kg CO ₂ /kg βιόμαζας	1.83	1.83	AquaFUELS
Απόδοση Δέσμευσης CO ₂	%	69	69	Παραδοχή (AquaFUELS)
Χαρακτηριστικά Μικροφυκών				
Ιδιότητα	Μονάδες	base	projected	Πηγή
Παραγωγικότητα α Βιόμαζας Μικροφυκών	kg/m ² /έτος	9	33	Mata et al. (2010)
Λιπδιακό Περιεχόμενο	% κ.β. ξηρής βιόμαζας μικροφυκών	30	50	Mata et al. (2010)
Παραγωγή Ελαίου	ελαίου/στρέμμα/έτος	11.74	19.56	Mata et al. (2010)
Χαρακτηριστικά Αντιδραστήρα & Μονάδας				
Ιδιότητα	Μονάδες	base	projected	Πηγή
Εξάτμιση Νερού	L/m ² /ημέρα	0.5	0.5	Παραδοχή (AquaFUELS)
Ρυθμός Αραιώσης	1/ημέρες	0.384	0.384	Παραδοχή (Christi)
Συγκέντρωση Κυττάρων	kg/m ³	4	4	Christi (2007) & Davis (2011)

Λόγος V/S (όγκος/επιφάνεια)	m ³ /m ²	0.07	0.07	AquaFUELS
Συνολική Κατανάλωση Ηλεκτρισμού	kWh/kg παραγόμενης βιομάζας μικροφυκών	3.81	3.81	Richardson et al. (2010)
Κόστος Αντιδραστήρα	€/στρέμμα	143000.00	24000.00	Mata et al. (2010)
Ετήσια Λειτουργία	Ημέρες	300	330	Παραδοχή (AquaFUELS)

Χαρακτηριστικά Βιοντίζελ

Ιδιότητα	Μονάδες	base	projected	Πηγή
Παραγωγή Βιοντίζελ ανά μονάδα εδάφους	kg/m ² /έτος	10.3854	17.303	Mata et al. (2010)
Ενεργειακό Περιεχόμενο Βιοντίζελ	MJ/kg	37.2	37.8	Khoo et al. (2011)
Έσοδα από Βιοντίζελ	€/kg	0.40	0.50	Παραδοχή

Αναερόβια Χώνευση - Παραγωγή Βιοαερίου & Ηλεκτρισμού

Ιδιότητα	Μονάδες	base	projected	Πηγή
Συνολικό Πάγιο Κόστος Συστήματος	€/στρέμμα	5465.5	4815.7	Zamalloa et al. (2011)
Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας	MWh/τόνο πτητικών στερεών	7.3959	8.9	Sialve et al. (2009)

Περιβαλλοντική Αποτίμηση Λειτουργίας Μονάδας

Ιδιότητα	Μονάδες	base	projected	Πηγή
Εκπομπές CO ₂ από τη λειτουργία της μονάδας	τόνοι CO ₂ /τόνοι βιοντίζελ	44.37	1.06	Lam et al. (2012)

Πίνακας IV.2.2

3. Βασικά Στοιχεία και Πληροφορίες για τις Περιπτώσεις που Μελετώνται

i. Σενάριο 1^ο – Πτολεμαΐδα

Χαρακτηριστικά Περιοχής			
Ιδιότητα	Μονάδες	Τιμή	Πηγή
Ηλιοφάνεια	kWh/m ² /έτος	1,810	http://ec.europa.eu [107]
Πληθυσμός	Κάτοικοι	45,450	Εθνική Απογραφή 2010[60]
Συνολική Έκταση	στρέμματα	217,900	http://www.geodata.gov.gr [108]
Μη Χρησιμοποιούμενη Έκταση	στρέμματα	33,400	http://www.geodata.gov.gr [108]
Εκπομπές CO ₂	τόνοι/έτος	9,650,000	http://carma.org [52]

Πίνακας IV.3.1

ii. Σενάριο 2^ο – Μεγαλόπολη

Χαρακτηριστικά Περιοχής			
Ιδιότητα	Μονάδες	Τιμή	Πηγή
Ηλιοφάνεια	kWh/m ² /έτος	1,960	http://ec.europa.eu
Πληθυσμός	Κάτοικοι	11,030	Εθνική Απογραφή 2010
Συνολική Έκταση	στρέμματα	331,000	http://www.geodata.gov.gr
Μη Χρησιμοποιούμενη Έκταση	στρέμματα	22,700	http://www.geodata.gov.gr
Εκπομπές CO ₂	τόνοι/έτος	4,460,000	http://carma.org

Πίνακας IV.3.2

iii. Σενάριο 3^ο – Κερασίσι

Χαρακτηριστικά Περιοχής			
Ιδιότητα	Μονάδες	Τιμή	Πηγή
Ηλιοφάνεια	kWh/m ² /έτος	2,050	http://ec.europa.eu
Πληθυσμός	Κάτοικοι	91,089	Εθνική Απογραφή 2010
Συνολική Έκταση	στρέμματα	8,000	http://www.geodata.gov.gr
Μη Χρησιμοποιούμενη Έκταση	στρέμματα	2,000	http://www.geodata.gov.gr
Εκπομπές CO ₂	τόνοι/έτος	488,240	http://carma.org

Πίνακας IV.3.3

iv. Σενάριο 4^ο – Σάμος

Χαρακτηριστικά Περιοχής			
Ιδιότητα	Μονάδες	Τιμή	Πηγή
Ηλιοφάνεια	kWh/m ² /έτος	2,110	http://ec.europa.eu
Πληθυσμός	Κάτοικοι	32,759	Εθνική Απογραφή 2010
Συνολική Έκταση	στρέμματα	780,600	http://www.geodata.gov.gr
Μη Χρησιμοποιούμενη Έκταση	στρέμματα	36,800	http://www.geodata.gov.gr
Εκπομπές CO ₂	τόνοι/έτος	105,260	http://carma.org

Πίνακας IV.3.4

v. Σενάριο 5^ο – Μήλος

Χαρακτηριστικά Περιοχής			
Ιδιότητα	Μονάδες	Τιμή	Πηγή
Ηλιοφάνεια	kWh/m ² /έτος	2,120	http://ec.europa.eu
Πληθυσμός	Κάτοικοι	4,959	Εθνική Απογραφή 2010
Συνολική Έκταση	στρέμματα	167,700	http://www.geodata.gov.gr
Μη Χρησιμοποιούμενη Έκταση	στρέμματα	13,800	http://www.geodata.gov.gr
Εκπομπές CO ₂	τόνοι/έτος	8,038	http://carma.org

Πίνακας IV.3.5

4. Αποτελέσματα Μελέτης Περιπτώσεων

Η ανάλυση των αποτελεσμάτων της μελέτης των περιπτώσεων πραγματοποιείται μέσω συγκριτικών πινάκων και διαγραμμάτων που αφορούν σε καίρια ζητήματα της αποτίμησης της βιωσιμότητας της μονάδας από τεχνικοοικονομικής πλευράς καθώς και με στόχο την προστασία του περιβάλλοντος.

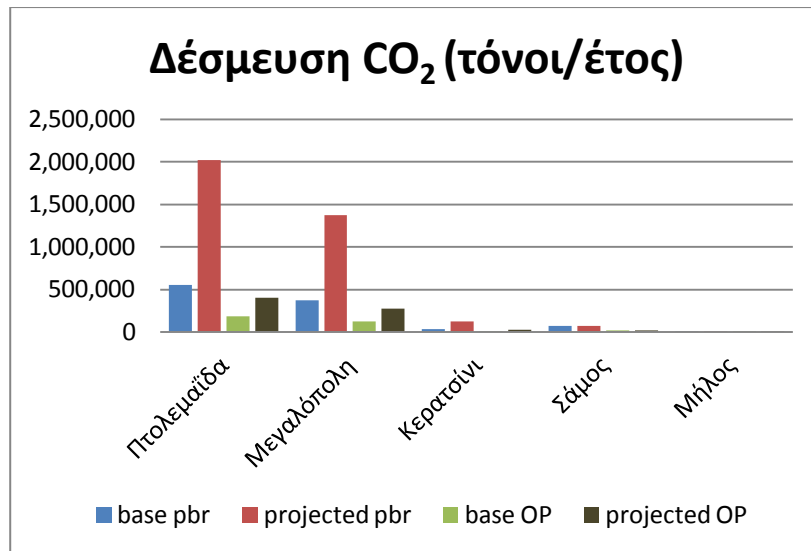
Οπότε, κρίνεται σημαντική η σύγκριση των περιπτώσεων ως προς τα εξής χαρακτηριστικά: δέσμευση CO₂ από τη μονάδα της ΔΕΗ, απαιτούμενη έκταση για την εγκατάσταση της μονάδας, συνολική ετήσια παραγωγή βιοντίζελ, συνολικό πάγιο κόστος, συνολικό ετήσιο λειτουργικό κόστος, αποτίμηση κέρδους/ζημιάς σε ετήσια βάση καθώς και παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών της μονάδας.

Στη συνέχεια φαίνονται οι πίνακες καθώς και τα αντίστοιχα διαγράμματα για καθένα από τα χαρακτηριστικά που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Επίσης, στο παράρτημα (Σχήματα Π.3 - Π.10) υπάρχουν διαγράμματα μόνο για τις περιπτώσεις: Κερασίни, Σάμος, Μήλος, για καλύτερη εμφάνιση των αποτελεσμάτων αυτών, αφού στα παρακάτω διαγράμματα είναι δύσκολη η ανάγνωση των αντιστοιχών αποτελεσμάτων, οπότε η σύγκριση των περιπτώσεων αυτών μπορεί να γίνει μόνο μέσω των τιμών των χαρακτηριστικών στους αντίστοιχους πίνακες.

ι. Ετήσια Δέσμευση CO₂ από τις Μονάδες της ΔΕΗ

Πόλη	Δέσμευση CO ₂ (τόνοι/έτος)			
	PBR		Ανοικτή Λίμνη	
	base	projected	base	projected
Πτολεμαΐδα	550,098	2,017,026	183,366	403,405
Μεγαλόπολη	373,869	1,370,853	124,623	274,171
Κερασίни	32,940	120,780	10,980	24,156
Σάμος	72,629	72,629	21,052	21,052
Μήλος	5,546	5,546	1,608	1,608

Πίνακας IV.4.1

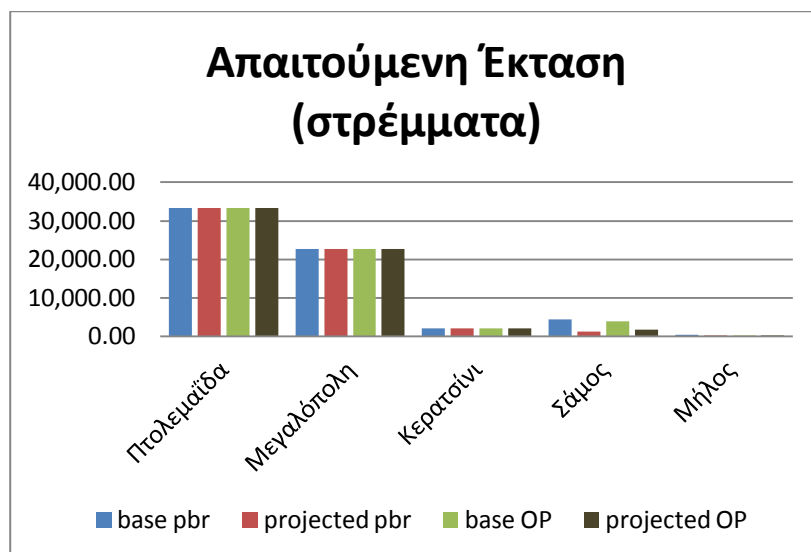


Σχήμα IV.4.1

ii. Απαιτούμενη Έκταση

Πόλη	Απαιτούμενη Έκταση (στρέμματα)			
	PBR		Ανοικτή Λίμνη	
	base	projected	base	projected
Πτολεμαΐδα	33,400.00	33,400.00	33,400.00	33,400.00
Μεγαλόπολη	22,700.00	22,700.00	22,700.00	22,700.00
Κερατσίνι	2,000.00	2,000.00	2,000.00	2,000.00
Σάμος	4,409.80	1,202.67	3,834.61	1,743.00
Μήλος	336.75	91.84	292.82	133.10

Πίνακας IV.4.2

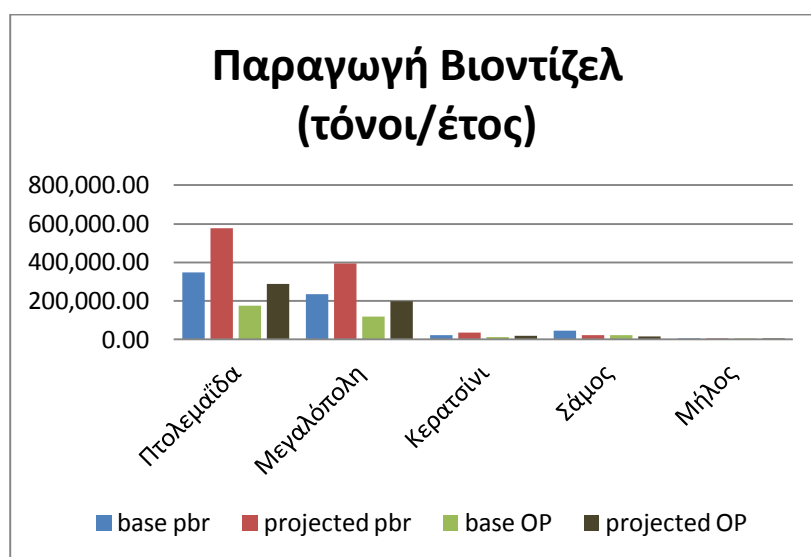


Σχήμα IV.4.2

iii. Συνολική Ετήσια Παραγωγή Βιοντίζελ

Πόλη	Συνολική Παραγωγή Βιοντίζελ (τόνοι/έτος)			
	PBR		Ανοικτή Λίμνη	
	base	projected	base	projected
Πτολεμαΐδα	346,872.36	577,920.20	173,436.18	288,960.10
Μεγαλόπολη	235,748.58	392,778.10	117,874.29	196,389.05
Κερατσίνι	20,770.80	34,606.00	10,385.40	17,303.00
Σάμος	45,797.53	20,809.84	19,911.97	15,079.60
Μήλος	3,497.25	1,589.11	1,520.54	1,151.53

Πίνακας IV.4.3

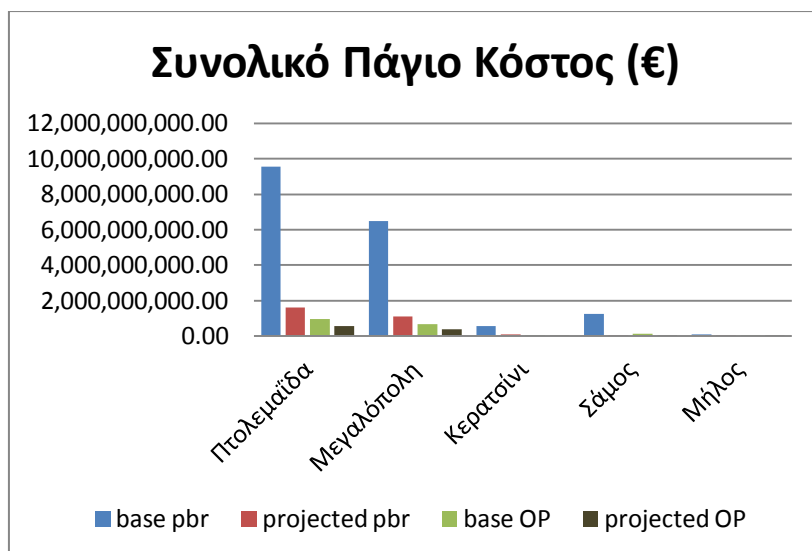


Σχήμα IV.4.3

iv. Συνολικό Πάγιο Κόστος

Πόλη	Συνολικό Πάγιο Κόστος (€)			
	PBR		Ανοικτή Λίμνη	
	base	projected	base	projected
Πτολεμαΐδα	9,562,420,000.00	1,611,884,000.00	965,260,000.00	543,084,000.00
Μεγαλόπολη	6,499,010,000.00	1,095,502,000.00	656,030,000.00	369,102,000.00
Κερατσίνι	572,600,000.00	96,520,000.00	57,800,000.00	32,520,000.00
Σάμος	1,262,525,635.70	58,040,981.02	110,820,182.15	28,341,241.93
Μήλος	96,410,612.39	4,432,200.32	8,462,593.81	2,164,230.50

Πίνακας IV.4.4

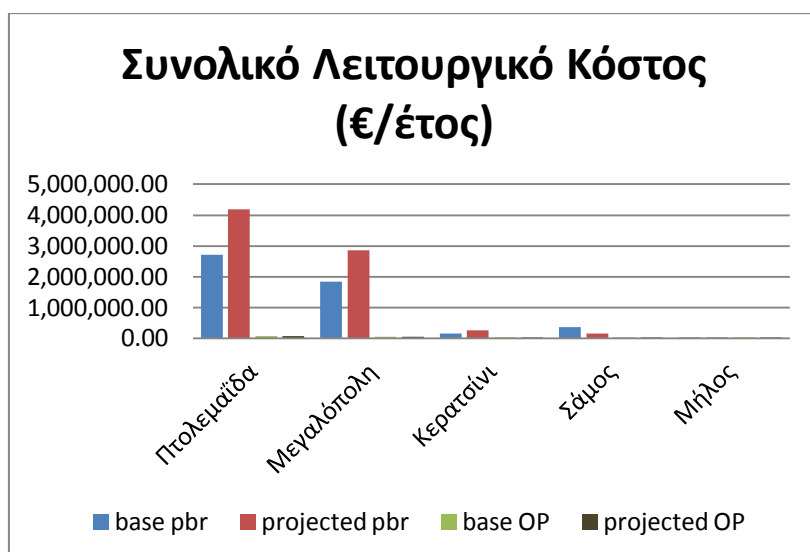


Σχήμα IV.4.4

ν. Συνολικό Ετήσιο Λειτουργικό Κόστος

Πόλη	Συνολικό Λειτουργικό Κόστος (€/έτος)			
	PBR		Ανοικτή Λίμνη	
	base	projected	base	projected
Πτολεμαΐδα	2,705,400.00	4,188,360.00	75,150.00	66,132.00
Μεγαλόπολη	1,838,700.00	2,846,580.00	51,075.00	44,946.00
Κερατσίνι	162,000.00	250,800.00	4,500.00	3,960.00
Σάμος	357,193.77	150,815.15	8,627.87	3,451.15
Μήλος	27,276.49	11,516.74	658.85	263.54

Πίνακας IV.4.5

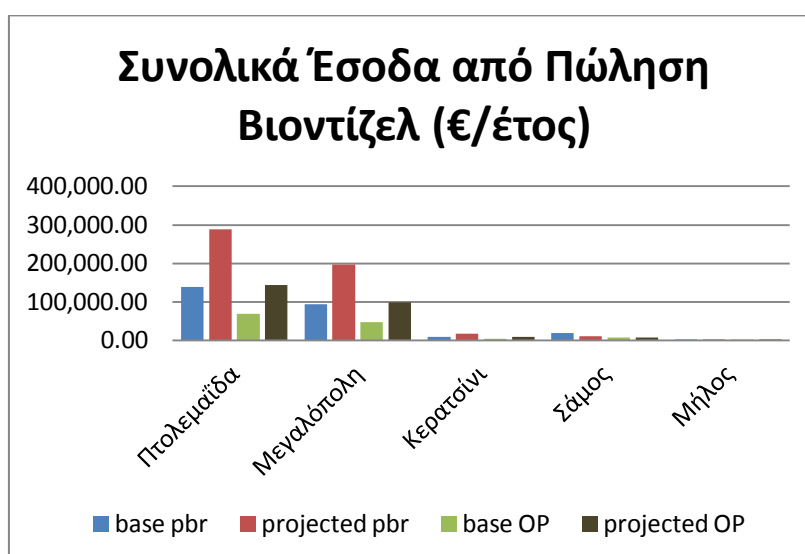


Σχήμα IV.4.5

vi. Συνολικά Ετήσια Έσοδα από Πώληση Βιοντίζελ

Πόλη	Συνολικά Έσοδα από Πώληση Βιοντίζελ (€/έτος)			
	PBR		Ανοικτή Λίμνη	
	base	projected	base	projected
Πτολεμαΐδα	138,748.94	288,960.10	69,374.47	144,480.05
Μεγαλόπολη	94,299.43	196,389.05	47,149.72	98,194.53
Κερατσίνι	8,308.32	17,303.00	4,154.16	8,651.50
Σάμος	18,319.01	10,404.92	7,964.79	7,539.80
Μήλος	1,398.90	794.55	608.22	575.76

Πίνακας IV.4.6

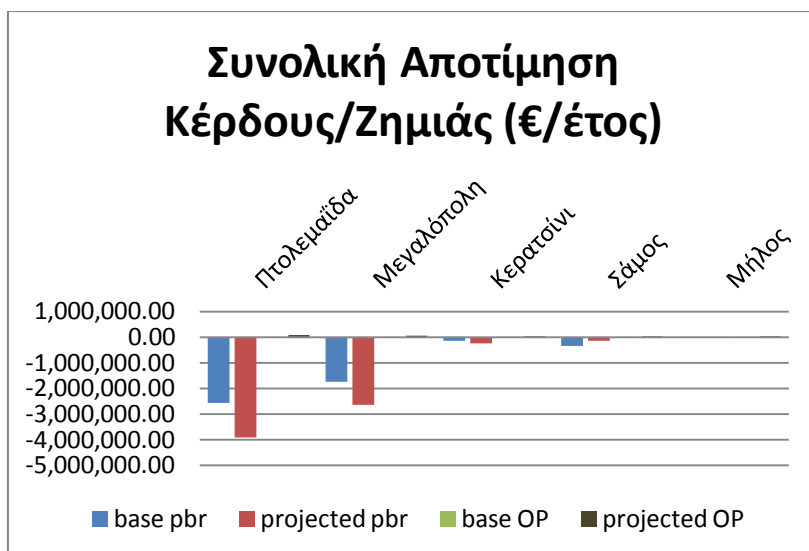


Σχήμα IV.4.6

vii. Αποτίμηση Κέρδους/Ζημιάς σε Ετήσια Βάση

Πόλη	Συνολική Αποτίμηση Κέρδους/Ζημιάς (€/έτος)			
	PBR		Ανοικτή Λίμνη	
	base	projected	base	projected
Πτολεμαΐδα	-2,566,651.06	-3,899,399.90	-5,775.53	78,348.05
Μεγαλόπολη	-1,744,400.57	-2,650,190.95	-3,925.28	53,248.53
Κερατσίνι	-153,691.68	-233,497.00	-345.84	4,691.50
Σάμος	-338,874.76	-140,410.23	-663.08	4,088.65
Μήλος	-25,877.59	-10,722.19	-50.64	312.22

Πίνακας IV.4.7

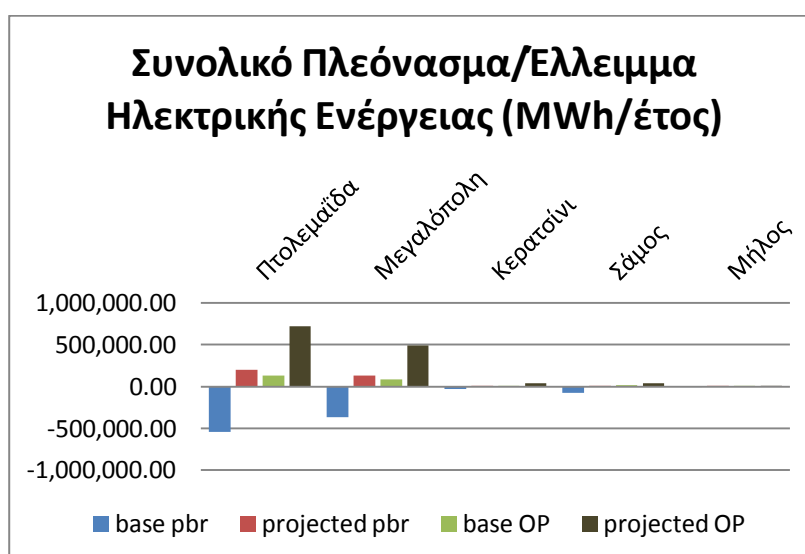


Σχήμα IV.4.7

viii. Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας για Κάλυψη των Αναγκών της Μονάδας

Πόλη	Συνολικό Πλεόνασμα/Ελλειμμα Ηλεκτρικής Ενέργειας (MWh/έτος)			
	PBR		Ανοικτή Λίμνη	
	base	projected	base	projected
Πτολεμαΐδα	-545,019.96	197,073.36	128,445.68	721,676.47
Μεγαλόπολη	-370,417.76	133,939.08	87,296.91	490,480.72
Κερατσίνι	-32,635.93	11,800.80	7,691.36	43,214.16
Σάμος	-71,958.95	7,096.25	14,746.67	37,661.22
Μήλος	-5,495.02	541.89	1,126.10	2,875.93

Πίνακας IV.4.8



Σχήμα IV.4.8

5. Συζήτηση Αποτελεσμάτων

i. Τεχνικοοικονομική Ανάλυση

Αρχικά αξίζει να αναφερθεί ότι τη βάση αναφοράς των υπολογισμών, στις περιπτώσεις της Πτολεμαΐδας, της Μεγαλόπολης και του Κερασινίου, αποτέλεσε η συνολική απαιτούμενη έκταση για την τοποθέτηση της μονάδας, αφού η παροχή του 100% των εκπομπών CO₂ του κοντινού εργοστασίου της ΔΕΗ απαιτούσε έκταση μεγαλύτερη της μη χρησιμοποιούμενης διαθέσιμης, στις περιοχές αυτές. Οπότε, ως βάση αναφοράς χρησιμοποιήθηκε το 100% της διαθέσιμης έκτασης, η οποία δεν εκμεταλλεύεται για άλλες χρήσεις, στις εν λόγω περιοχές.

Στις υπόλοιπες δύο περιπτώσεις (Σάμος και Μήλος), η κάλυψη του 100% της διαθέσιμης έκτασης δεν είχε νόημα, αφού η παροχή του 100% του CO₂ στη μονάδα παραγωγής βιοντίζελ, απαιτεί πολύ λιγότερη έκταση για να εκμεταλλευθεί πλήρως από τη μονάδα. Επομένως, σε αυτές τις δύο περιπτώσεις χρησιμοποιήθηκε η παροχή του 100% του CO₂ του κοντινού εργοστασίου της ΔΕΗ στη μονάδα.

Από τα αποτελέσματα της μελέτης μπορεί να εξαχθεί το ασφαλές συμπέρασμα ότι η τάξη μεγέθους των χαρακτηριστικών μειώνεται ανάλογα με τη δυναμικότητα της εκάστοτε μονάδας, η οποία προέρχεται από την δέσμευση του CO₂ του εργοστασίου παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας της ΔΕΗ, το οποίο βρίσκεται σε κοντινή απόσταση από τη μονάδα. Πιο συγκεκριμένα, η μέγιστη ποσότητα δεσμευμένου CO₂ παρουσιάζεται στην περίπτωση της εγκατάστασης μίας μονάδας παραγωγής μικροφυκών στην περιοχή της Πτολεμαΐδας με χρήση φωτοβιοαντιδραστήρα (PBR) για την καλλιέργεια των μικροφυκών. Πιο αναλυτικά, στη βασική εκδοχή (base case) δεσμεύονται 550,098 τόνοι CO₂ ανά έτος, ενώ στην καλύτερη εκδοχή (projected case) 2,017,026 τόνοι CO₂ ανά έτος. Αντίθετα, στη Μήλο παρουσιάζονται οι χαμηλότερες ποσότητες δεσμευμένου CO₂, δηλαδή 1,608 τόνοι CO₂ ανά έτος και για τις δύο εκδοχές (βασική και καλύτερη) με χρήση ανοικτής λίμνης για την καλλιέργεια των μικροφυκών.

Αυτό εξηγείται κυρίως από δύο λόγους: την παροχή του CO₂ στη μονάδα, δεδομένου ότι στην Πτολεμαΐδα βρίσκεται το εργοστάσιο της ΔΕΗ με τις υψηλότερες εκπομπές CO₂ στην Ελλάδα, ενώ στη Μήλο έχει τις χαμηλότερες εκπομπές CO₂ από όλες τις περιπτώσεις που εξετάζονται, και την αυξημένη απόδοση δέσμευσης CO₂ στον φωτοβιοαντιδραστήρα (PBR) συγκριτικά με την ανοικτή λίμνη. Εκτός από τη δέσμευση του CO₂, υπάρχουν και εκπομπές αυτού κατά τη λειτουργία της μονάδας, οι οποίες είναι δυνατόν να ελαχιστοποιηθούν με χρήση διεργασιών, οι οποίες είναι φιλικές προς το περιβάλλον.

Επιπρόσθετα, η αυξημένη δέσμευση CO₂ στην περίπτωση της Πτολεμαΐδας εξηγείται από την συνολική έκταση της μονάδας παραγωγής βιοντίζελ, η οποία είναι μεγαλύτερη από όλες τις υπόλοιπες περιπτώσεις (33,400 στρέμματα). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την μέγιστη παραγωγή βιομάζας μικροφυκών, η οποία οδηγεί σε αντίστοιχο μέγιστο στην παραγωγή του βιοντίζελ στο σενάριο αυτό. Πιο αναλυτικά, η ετήσια παραγωγή βιοντίζελ ανέρχεται σε 346,872.36 τόνους στη βασική εκδοχή και 557,920.20 τόνους στην καλύτερη εκδοχή. Στην περίπτωση της Μήλου, η παραγωγή είναι η ελάχιστη από όλα τα σενάρια, 1,520.54 τόνους βιοντίζελ στη βασική και 1,151.53 τόνους βιοντίζελ

στην καλύτερη εκδοχή, αλλά και η απαιτούμενη έκταση για τη μονάδα είναι η μικρότερη, 292.82 και 133.10 στρέμματα για τις προηγούμενες δύο παραγωγές, και 91.84 στρέμματα στην περίπτωση της καλύτερης δυνατής παραγωγής σε φωτοβιοαντιδραστήρα.

Σε αυτό το σημείο αξίζει να αναφερθεί η συνολική κατανάλωση καυσίμων (για τις μεταφορές) στην Ελλάδα, η οποία ανήλθε σε 4.381.000 χιλιόλιτρα βενζίνης, το 2010. Στις περιπτώσεις κάλυψης της αντίστοιχης ζήτησης, η πλεονάζουσα ποσότητα οδηγείται σε εξαγωγή σε άλλες χώρες. [109]

Όπως είναι αναμενόμενο, οι εκτάσεις και οι αντίστοιχες παραγωγές είναι άμεσα συνδεδεμένες με το πάγιο και το λειτουργικό κόστος της μονάδας, αλλά και με τα ετήσια έσοδα από την πώληση του βιοντίζελ και την επιδότηση δέσμευσης του CO₂ από την Ευρωπαϊκή Ένωση, σύμφωνα με τις διατάξεις που αναλύθηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο της εργασίας.

Το συνολικό πάγιο κόστος της μελέτης των περιπτώσεων κυμαίνεται από 2,164,230.50 € στην καλύτερη εκδοχή της ανάπτυξης των μικροφυκών σε ανοικτή λίμνη, στην περιοχή της Μήλου, έως 9,562,420,000.00 € στη βασική εκδοχή της ανάπτυξης των μικροφυκών σε φωτοβιοαντιδραστήρα (PBR), στην περιοχή της Πτολεμαΐδας. Στον υπολογισμό του πάγιου κόστους που παρουσιάζεται στο κύριο μέρος της εργασίας, δεν συνυπολογίζεται το κόστος αγοράς Γης, αφού αυτό διαφέρει ανάλογα με την περιοχή. Παρόλα αυτά, στα αναλυτικά αποτελέσματα, τα οποία βρίσκονται στο παράρτημα (Πίνακες Π.11 - Π.20: Υπολογισμοί σε Πράσινο Φόντο) της εργασίας, γίνεται εκτίμηση αυτού και συνυπολογισμός του στο συνολικό πάγιο κόστος της μονάδας, ενώ ταυτόχρονα εκτιμάται το πάγιο κόστος, πριν προστεθεί το κόστος αγοράς Γης σε αυτό (Πίνακες Π.11 - Π.20: Υπολογισμοί σε Γαλάζιο Φόντο).

Όσον αφορά στο λειτουργικό κόστος της μονάδας, αυτό υπολογίζεται σε ετήσια βάση και κυμαίνεται από 263.54 € στη καλύτερη εκδοχή της ανοικτής λίμνης στη Μήλο έως 4,188,360.00 € στην καλύτερη εκδοχή του φωτοβιοαντιδραστήρα (PBR) στην Πτολεμαΐδα. Τα αντίστοιχα έσοδα, σε ετήσια βάση, από την πώληση του βιοντίζελ στις δύο αυτές περιπτώσεις ανέρχονται σε 288,960.10 € και 608.22 € αντίστοιχα. Στον υπολογισμό του λειτουργικού κόστους δεν συμπεριλαμβάνονται κόστη για νερό, θρεπτικά συστατικά και CO₂, καθώς αυτά θεωρούνται ότι παρέχονται δωρεάν στη μονάδα στην περίπτωση χρήσης θαλασσινού νερού, θρεπτικών συστατικών από την απορροή μονάδας επεξεργασίας αστικών λυμάτων, με στόχο την εξάλειψη του φαινομένου του ευτροφισμού, όπως έχει ήδη αναφερθεί, και CO₂ από τη μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας της ΔΕΗ που βρίσκεται κοντά στη μονάδα παραγωγής βιοντίζελ από μικροφύκη. Άλλο ένα κόστος το οποίο δεν συνυπολογίζεται στο συνολικό ετήσιο λειτουργικό κόστος είναι εκείνο του ηλεκτρισμού, αφού στις περισσότερες περιπτώσεις, οι ανάγκες της μονάδας σε ηλεκτρική ενέργεια καλύπτονται από την παραγωγή της τελευταίας με μετεπεξεργασία της υπολειμματικής βιομάζας των μικροφυκών με αναερόβια χώνευση. Εξάλλου όπως φαίνεται και στα αποτελέσματα της μελέτης στις 3 από τις 4 εκδοχές (εκτός της βασικής εκδοχής για τους PBR) υπερκαλύπτονται οι ανάγκες αυτές και δημιουργείται πλεόνασμα ηλεκτρικής ενέργειας που μπορεί να πωληθεί στο αντίστοιχο δίκτυο. Τέλος, να αναφερθεί ότι ο συνυπολογισμός των παραπάνω παραγόντων στο συνολικό λειτουργικό κόστος μπορεί να βρεθεί στο παράρτημα (Πίνακες Π.11 - Π.20: Υπολογισμοί σε Πράσινο Φόντο) της εργασίας (εκτός του CO₂ που θεωρείται ότι παρέχεται δωρεάν σε κάθε περίπτωση), ενώ παράλληλα υπολογίζεται το λειτουργικό κόστος χωρίς συνεκτίμηση των εν λόγω παραγόντων (Πίνακες

Π.11 - Π.20: Υπολογισμοί σε Γαλάζιο Φόντο). Το τελευταίο αποτελεί την πλέον ρεαλιστική εκδοχή.

Η αποτίμηση του κέρδους, ή της ζημιάς, της επιχείρησης, σε ετήσια βάση, δείχνει ότι μόνο στην περίπτωση της καλύτερης εκδοχής της ανοικτής λίμνης σε κάθε σενάριο παρουσιάζεται κέρδος. Αυτή η εκτίμηση του κέρδους γίνεται μόνο με τον υπολογισμό των εσόδων από την πώληση του βιοντίζελ. Όμως, στην περίπτωση ύπαρξης επιδότησης για τη δέσμευση του CO₂, το κέρδος της μονάδας αυξάνεται σημαντικά. Για αυτόν τον λόγο ακολουθεί μία αναλυτική αποτίμηση της βιωσιμότητας της μονάδας.

ii. Αποτίμηση Βιωσιμότητας Μονάδας

Στον παρακάτω πίνακα φαίνεται η απαιτούμενη επιδότηση, σε ετήσια βάση, για ισορροπία κέρδους ζημιάς, δηλαδή εξίσωση των εσόδων με τα έξοδα, στις 2 εκδοχές (βασική και καλύτερη) για τους φωτοβιοαντιδραστήρες (PBR) και τις ανοικτές λίμνες.

<i>Ελάχιστη Απαιτούμενη Επιδότηση Δέσμευσης CO₂ για Ισορροπία Κέρδους/Ζημιάς</i>			
Ιδιότητα	Μονάδες	base	projected
PBR – Ετήσια Επιδότηση CO ₂	€/τόνο CO ₂	4.67	1.93
Ανοικτή Λίμνη – Ετήσια Επιδότηση CO ₂	€/τόνο CO ₂	0.03	0.00

Πίνακας IV.5.1

Επίσης, η απαιτούμενη ετήσια επιδότηση για την απόσβεση του αρχικού κεφαλαίου σε εύλογο χρονικό διάστημα (50 έτη) φαίνεται στον παρακάτω πίνακα.

<i>Απαιτούμενη Επιδότηση Δέσμευσης CO₂ για Απόσβεση Αρχικού Κεφαλαίου σε 50 έτη</i>			
Ιδιότητα	Μονάδες	base	projected
PBR – Ετήσια Επιδότηση CO ₂	€/τόνο CO ₂	347.41	15.84
Ανοικτή Λίμνη - Ετήσια Επιδότηση CO ₂	€/τόνο CO ₂	104.90	26.57

Πίνακας IV.5.2

Από τα αποτελέσματα της βιωσιμότητας της μονάδας παρατηρείται ότι για εξίσωση των εξόδων με τα έσοδα απαιτούνται έως και 4.67 € ανά τόνο δεσμευμένου CO₂ σε ετήσια βάση στη βασική εκδοχή του PBR, ενώ δεν χρειάζεται επιδότηση στην περίπτωση της ανοικτής λίμνης λαμβάνοντας υπόψη την καλύτερη εκδοχή. Η απόσβεση του αρχικού κεφαλαίου είναι δυνατόν να επιτευχθεί σε 50 έτη με σημαντική επιδότηση για τη δέσμευση του CO₂, η οποία μπορεί να φτάσει τα 347.41 € ανά τόνο δεσμευμένου CO₂, ενώ στην καλύτερη περίπτωση πρέπει να ανέρχεται σε 15.84 € ανά τόνο δεσμευμένου CO₂.

Σε μία άλλη προσέγγιση, υπολογίζεται ότι η τιμή πώλησης του βιοντίζελ, ώστε αυτό να αντικαταστήσει το πετρέλαιο, ως πρώτη ύλη υδρογονανθράκων στην πετροχημική βιομηχανία, με την παραδοχή ότι το βιοντίζελ από μικροφύκη έχει ενεργειακό περιεχόμενο ίσο με το 80% αυτού του πετρελαίου, δίνεται από τον παρακάτω τύπο. [68]

$$C_{\text{βιοντίζελ από μικροφύκη}} = 6.9 \cdot 10^{-3} C_{\text{πετρελαίου}}$$

Η τιμή του βιοντίζελ από μικροφύκη δίνεται σε USD/L, ενώ η τιμή του πετρελαίου σε USD/βαρέλι. Πιο αναλυτικά, αν η τιμή του πετρελαίου ανέρχεται σε 60 USD/βαρέλι, τότε το βιοντίζελ από μικροφύκη δεν πρέπει να κοστίζει περισσότερο από 0.41 USD/L για να αντικαταστήσει πλήρως το πετρέλαιο. [68]

iii. Περιβαλλοντική Αποτίμηση Λειτουργίας Μονάδας

Στη συνέχεια γίνεται μία περιβαλλοντική αποτίμηση της λειτουργίας της μονάδας. Ειδικότερα, στοιχεία της βιβλιογραφίας παρουσιάζουν τις εκπομπές CO₂ κατά τη λειτουργία της μονάδας. Αυτοί οι υπολογισμοί για τους φωτοβιοαντιδραστήρες (PBR) και τις ανοικτές λίμνες παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί.

Ιδιότητα	Μονάδες	base	projected	Πηγή
Εκπομπές CO ₂ από τη λειτουργία της μονάδας - PBR	τόνοι CO ₂ /τόνοι βιοντίζελ	44.37	1.06	Lam et al. (2012)
Εκπομπές CO ₂ από τη λειτουργία της μονάδας – Ανοικτή Λίμνη	τόνοι CO ₂ /τόνοι βιοντίζελ	15.46	0.35	Lam et al. (2012)

Πίνακας IV.5.3

Η βασική εκδοχή αποτελείται από τις εξής επιλογές:

Δακτυλοειδής PBR ή βασική εκδοχή ανοικτής λίμνης, βασικές εκδοχές φυγοκέντρησης (για τη συλλογή), χρήσης εξανίου (για την εξαγωγή των λιπιδίων) και χρήσης MeOH και NaOH (για τη μετεστεροποίηση των λιπιδίων).

Η καλύτερη εκδοχή αποτελείται από τις εξής επιλογές:

Air-Lift PBR ή καλύτερη εκδοχή ανοικτής λίμνης, κροκίδωση (για τη συλλογή), χρήση εξανίου και αιθανόλης σε αναλογία 9:1 (για την εξαγωγή των λιπιδίων) και καλύτερη εκδοχή χρήσης MeOH και καταλύτη (για τη μετεστεροποίηση των λιπιδίων).

Οι εκδοχές αυτές περιγράφονται αναλυτικά, μαζί με άλλες ενδιαμέσες λύσεις στο παράρτημα (Πίνακας Π.21). [106]

Οι εκτιμήσεις αυτές δείχνουν ότι για την βιωσιμότητα της μονάδας, από περιβαλλοντικής πλευράς, κάτι το οποίο αποτελεί κύριο στόχο της φιλοσοφίας για τη στροφή στις εναλλακτικές πηγές καυσίμων, παράλληλα με τα περιορισμένα αποθέματα πετρελαίου, μπορεί να επιτευχθεί μόνο με την διεξαγωγή διεργασιών φιλικών προς το περιβάλλον, οι οποίες αποτελούν την καλύτερη εκδοχή που μελετήθηκε παραπάνω. Σε αντίθετη περίπτωση, η μονάδα κινδυνεύει να χάσει τον περιβαλλοντικό της χαρακτήρα και τα οφέλη που έχει χάρη σε αυτόν, όπως η επιδότηση για τη δέσμευση του CO₂.

V. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Συνολικά, σε αυτήν την εργασία πραγματοποιήθηκε μία ενδελεχής μελέτη της παραγωγής βιοντίζελ από μικροφύκη. Πιο αναλυτικά, μελετήθηκαν τα διάφορα στάδια της παραγωγής και ταυτόχρονα παρουσιάστηκαν τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των διαθέσιμων τεχνικών για την ολοκλήρωση καθενός σταδίου.

Το κομμάτι που προηγείται της ανάλυσης της παραγωγικής διαδικασίας είναι εκείνο της επιχειρηματολογίας, μέσω βιβλιογραφικών δεδομένων, μετρήσεων και υπολογισμών, για τη χρήση των μικροφυκών ως πρώτη ύλη για την παραγωγή βιοντίζελ, έναντι των συμβατικών μέχρι στιγμής πηγών, όπως το σογιέλαιο, η ελαιοκράμβη, το σιτάρι και άλλοι φυτικοί οργανισμοί. Τα μικροφύκη παρουσιάζουν αρκετά πλεονεκτήματα συγκριτικά με τους ανταγωνιστές τους με τα κυριότερα να είναι η αυξημένη παραγωγικότητα, οπότε και η απαίτηση μικρότερης έκτασης για την παραγωγή του βιοντίζελ, και η δυνατότητα ανάπτυξης τους σε μη καλλιεργήσιμες εκτάσεις.

Στη συνέχεια ακολουθεί ανάλυση των σταδίων για την παραγωγή βιοντίζελ από μικροφύκη. Αρχικά, επιλέγεται το είδος του μικροφύκου που θα χρησιμοποιηθεί στην καλλιέργεια. Αυτό εξαρτάται από τις συνθήκες τις καλλιέργειας, ειδικά την επιλογή χρήσης γλυκού ή αλμυρού νερού σε αυτή. Έπειτα, τα φύκη οδηγούνται σε έναν αντιδραστήρα όπου αναπτύσσονται με την παροχή των απαραίτητων θρεπτικών συστατικών, όπως N, P, CO₂, φωτεινή ενέργεια, τα οποία χρειάζονται για τη φωτοσύνθεση των οργανισμών αυτών. Η καλλιέργεια των μικροφυκών μπορεί να γίνει σε ανοικτή λίμνη ή σε φωτοβιοαντιδραστήρα (PBR). Από τη μελέτη αυτή προκύπτει ότι η χρήση ανοικτής λίμνης, η οποία μπορεί να καλύπτεται από μία μεμβράνη πολυαιθυλενίου (PE) για την αποφυγή της μόλυνσης της καλλιέργειας, οπότε και των τελικών προϊόντων της επεξεργασίας αυτής, από εξωτερικούς παράγοντες, όπως παθογόνους μικροοργανισμούς που βρίσκονται στον περιβάλλοντα χώρο, αποτελεί την πλέον συμφέρουσα λύση από τεχνικοοικονομικής, και ταυτόχρονα περιβαλλοντικής, σκοπιάς. Άλλωστε, στην καλύτερη εκδοχή της ανοικτής λίμνης, όπως αυτή περιγράφεται στο κεφάλαιο της μελέτης περιπτώσεων, η παραγωγή παρουσιάζει κέρδος. Από την άλλη πλευρά, οι φωτοβιοαντιδραστήρες (PBR) είναι απαραίτητη στην περίπτωση που απαιτούνται μεγάλες ποσότητες παραγωγής, ενώ παρουσιάζουν αρκετά πλεονεκτήματα έναντι των ανοικτών λιμνών, όπως υψηλότερη απόδοση δέσμευσης CO₂ και παραγωγής, μικρότερη απαιτούμενη έκταση για την παραγωγή ίδιας ποσότητας μικροφυκών, ευκολότερος χειρισμός και έλεγχος της καλλιέργειας, καθώς και αυξημένη συγκέντρωση κυττάρων, ώστε να διευκολύνεται η συλλογή, όχι όμως σε βαθμό που να μην εισχωρεί το φως στα κατώτερα στρώματα. Παρόλα αυτά, το αυξημένο λειτουργικό κόστος σε συνδυασμό με το πολύ υψηλό απαιτούμενο αρχικό κεφάλαιο, καθιστούν τους φωτοβιοαντιδραστήρες (PBR) κατάλληλους για χρήση, όταν κύριος στόχος της παραγωγής είναι τα προϊόντα υψηλής προστιθέμενης αξίας, στα οποία δεν συμπεριλαμβάνεται το βιοντίζελ.

Έπειτα, ακολουθεί συλλογή των μικροφυκών από την καλλιέργεια, στην οποία βρίσκονται σε μεγάλο ποσοστό αραιώσης. Το στάδιο της συλλογής παρουσιάζει πολύ μεγάλο κόστος, το οποίο ανέρχεται σε ποσοστό 20-30% του συνολικού κόστους παραγωγής. Μία από τις πιο δημοφιλείς τεχνικές συλλογής είναι η φυγοκέντρωση, η οποία ήδη χρησιμοποιείται σε αντίστοιχες παραγωγικές μονάδες και παρουσιάζει πολύ υψηλά

ποσοστά ανάκτησης των μικροφυκών από την καλλιέργεια (> 90%), αλλά ταυτόχρονα έχει υψηλό λειτουργικό κόστος και εκπομπές CO₂. Μία ανταγωνιστική μέθοδο συλλογής αποτελεί η κροκίδωση, η οποία μπορεί να επιτευχθεί είτε με φυσικά, χημικά ή βιολογικά μέσα είτε αυθόρμητα (αυτοκροκίδωση), ενώ έχει αποδειχθεί ότι τα δύο τελευταία μπορούν να συνδυαστούν στην περίπτωση κροκίδωσης ενός είδους μικροφύκους με προσθήκη άλλου είδους το οποίο αυτοκροκιδώνεται. Το μειονέκτημα της κροκίδωσης, ιδιαίτερα στην περίπτωση της χημικής κροκίδωσης, είναι η μετέπειτα απομάκρυνση των χημικών μέσων από τα μικροφύκη, προς αποφυγή μόλυνσης. Με την κροκίδωση μπορεί να επιτευχθεί συλλογή των μικροφυκών σε ποσοστό 70-95% από το μίγμα. Άλλες δημοφιλείς τεχνικές αποτελούν η βαρυτική καθίζηση, το φιλτράρισμα και η επίπλευση με διαλυμένο αέρα (DAF). Τέλος, η λύση που προτείνεται από τη μελέτη αυτή είναι η συλλογή των μικροφυκών με συνδυασμό κροκίδωσης και φυγοκέντρισης με την πρώτη να προηγείται της δεύτερης με στόχο την εξισορρόπηση κόστους και αποτελεσματικότητας συλλογής.

Το στάδιο που ακολουθεί τη συλλογή είναι αυτό της εξαγωγής των λιπιδίων από τα μικροφύκη. Πριν από αυτή, τα μικροφύκη χρειάζεται να περάσουν από τα στάδια της απονέρωσης και της διάσπασης των κυττάρων, τα οποία αποτελούν προπαρασκευαστικά στάδια της εξαγωγής των λιπιδίων από τα μικροφύκη. Αυτές οι δύο τεχνικές χρησιμοποιούνται με στόχο την αύξηση της απόδοσης της εξαγωγής των λιπιδίων, λόγω της μείωσης του μεγέθους των σωματιδίων, η οποία είναι το φυσικό αποτέλεσμα της συσσώρευσης των μικροφυκών μετά την απομάκρυνση του νερού και την επακόλουθη άλεση των σωματιδίων σε διαφορετικά μεγέθη. Η μείωση του μεγέθους των σωματιδίων έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της επιφάνειας για την αλληλεπίδραση της βιόμαζας με τον διαλύτη και τη μείωση της διαδρομής των μορίων του τελευταίου κατά τη διάχυση. Η απονέρωση συνήθως πραγματοποιείται με ξήρανση των μικροφυκών, ενώ παρουσιάζει υψηλό λειτουργικό κόστος. Η πιο οικονομική λύση είναι αυτή της ηλιακής ξήρανσης, η οποία όμως δεν έχει πολύ υψηλή απόδοση. Μία τεχνική η οποία προτιμάται, σε βιομηχανική κλίμακα, είναι αυτή του “freeze drying”, λόγω των ομαλών λειτουργικών συνθηκών και της αποφυγής της αποδόμησης των μικροφυκών, η οποία είναι πολύ πιθανό να συμβεί με τη χρήση ανταγωνιστικών τεχνικών όπως η θερμική ξήρανση. Η κυτταρική διάσπαση έχει ως αποτέλεσμα τον διαχωρισμό των λιπιδίων και της βιόμαζας από την οποία αυτά προέρχονται, κάτι το οποίο αυξάνει την απόδοση της εξαγωγής των λιπιδίων αφού αυτά έρχονται σε άμεση επαφή με τον διαλύτη στον διακυτταρικό χώρο. Μελέτες με αντικείμενο τη διάσπαση των κυττάρων έχουν δείξει ότι η πλέον αποδοτική μέθοδος κυτταρικής διάσπασης, σε βιομηχανική κλίμακα, είναι η άλεση των σωματιδίων.

Η εξαγωγή των λιπιδίων μπορεί να επιτευχθεί κυρίως με χρήση οργανικών διαλυτών. Πιο συνηθισμένη είναι η χρήση μίγματος πολικού με μη πολικό διαλύτη για την εξαγωγή πολικών και ουδέτερων λιπιδίων, τα οποία στη συνέχεια διαχωρίζονται, αφού τα ουδέτερα είναι τα χρήσιμα λιπίδια για την παραγωγή βιοντίζελ με μετεστεροποίηση. Συνήθως, σε αυτό το σημείο χρησιμοποιείται διφασικός διαχωρισμός της υδατικής από την οργανική φάση. Οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενοι οργανικοί διαλύτες είναι το χλωροφόρμιο και το εξάνιο σε συνδυασμό με τη μεθανόλη, ενώ μόνο η χρήση καθαρής αλκοόλης για την εξαγωγή των λιπιδίων δεν είναι αποτελεσματική για το σύνολο αυτών. Στη συνέχεια, λαμβάνει χώρα η μετεστεροποίηση των ουδέτερων λιπιδίων σε βιοντίζελ, το οποίο ουσιαστικά είναι μεθυλεστέρας λιπαρών οξέων (FAME). Η αντίδραση της μετεστεροποίησης περιλαμβάνει το υπόστρωμα, τον ρόλο του οποίου έχει κάποια αλκοόλη,

συνήθως μεθανόλη, το οποίο αντιδρά με τα τριγλυκερίδια (TAG), λιπίδια που έχουν εξαχθεί από τα μικροφύκη, προς σχηματισμό βιοντίζελ (FAME) και γλυκερίνη, παρουσία καταλύτη, ο οποίος είναι συνήθως οξικός ή αλκαλικός.

Η υπολειμματική βιομάζα των μικροφυκών οδηγείται σε αναερόβιο χωνευτήρα με στόχο την παραγωγή ηλεκτρισμού για την κάλυψη των αναγκών της μονάδας, κάτι το οποίο φαίνεται να ικανοποιείται στις 3 από τις 4 εκδοχές που μελετήθηκαν για όλα τα σενάρια, εκτός δηλαδή από τη βασική εκδοχή για τον φωτοβιοαντιδραστήρα (PBR). Η γλυκερίνη που αποτελεί προϊόν της παραγωγικής διαδικασίας έχει γνωστές εφαρμογές ως πρώτη ύλη στη χημική βιομηχανία, ειδικότερα στην περίπτωση των χρωμάτων και στη φαρμακοβιομηχανία.

Εκτός από τις συμβατικές τεχνικές, αναπτύχθηκαν οι προοπτικές των μελλοντικών τεχνικών που στοχεύουν στην αυξημένη παραγωγικότητα των μικροφυκών σε λιπίδια καθώς και σε οικονομικότερες λύσεις των σταδίων που παρουσιάζουν υψηλό κόστος, όπως η συλλογή. Ειδικότερα, αναλύθηκε η γενετική τροποποίηση ώστε να υπερεκφράζονται τα επιθυμητά γονίδια που στοχεύουν στην παραγωγή των λιπιδίων και η εξαγωγή αυτών με χρήση υπερκρίσιμου CO₂ (Supercritical CO₂ - SCCO₂). Ακόμη, η μαγνητική συλλογή των λιπιδίων αποτελεί μια τεχνική η οποία εξετάζεται με στόχο τη μείωση, σε σημαντικό βαθμό, του κόστους αυτού του σταδίου.

Τέλος, διεξήχθη μελέτη ορισμένων περιπτώσεων για παραγωγή βιοντίζελ από μικροφύκη στην Ελλάδα. Τα αποτελέσματα της μελέτης αυτής έδειξαν ότι μόνο στην καλύτερη εκδοχή για την ανοικτή λίμνη εμφανίζεται κέρδος, λαμβάνοντας ως μοναδικά έσοδα, αυτά που προέρχονται από την πώληση του βιοντίζελ. Τη μελέτη των περιπτώσεων ακολουθεί μία ανάλυση βιωσιμότητας της μονάδας, η οποία οδηγεί σε συμπεράσματα για το ύψος της επιδότησης για τη δέσμευση του CO₂, η οποία απαιτείται για την ύπαρξη μηδενικής ζημιάς, ή κέρδους, καθώς και την ετήσια επιδότηση για το CO₂ η οποία θα οδηγήσει σε απόσβεση του αρχικού κεφαλαίου σε 50 έτη. Η δέσμευση του CO₂ αποτελεί μία υπηρεσία που παρέχεται από τη μονάδα, αφού οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου (Greenhouse Gases - GHGs) και ειδικότερα οι εκπομπές CO₂ υπόκεινται σε φορολογία από την Ευρωπαϊκή Ένωση. Για αυτόν τον λόγο αναλύθηκαν, εκτενώς, τα νομοθετικά πλαίσια που θεσπίζονται από την Ε.Ε. αναφορικά με τα καύσιμα και ορίζουν πρόστιμα για τις εκπομπές CO₂, τα οποία ανέρχονται σε 20 € ανά τόνο εκπεμπόμενου CO₂, το έτος 2013, αλλά αναφέρονται και στο ενεργειακό περιεχόμενο καθώς και στις ανανεώσιμες πηγές καυσίμων. Πιο αναλυτικά, πλέον θα φορολογείται το ενεργειακό περιεχόμενο του καυσίμου αντί του όγκου του (9.6 €/GJ), όμως από τη φορολογία αυτή απαλλάσσονται προσωρινά τα βιοκαύσιμα, διότι η Ε.Ε. επενδύει στις εναλλακτικές μορφές ενέργειας ως κομμάτι της περιβαλλοντικής πολιτικής που ακολουθείται τα τελευταία χρόνια. Με αυτόν τον τρόπο, τα βιοκαύσιμα καθίστανται ανταγωνιστικά των συμβατικών καυσίμων, τα οποία έχουν χαμηλότερο κόστος, υψηλότερο ενεργειακό περιεχόμενο αλλά και υψηλότερες εκπομπές CO₂ κατά τη διάρκεια του σταδίου της παραγωγής τους.

Τέλος, η περιβαλλοντική αποτίμηση της μονάδας καθορίζει τις επιλογές των τεχνικών για κάθε στάδιο, ώστε η μονάδα να κρατήσει τον περιβαλλοντικό χαρακτήρα, ο οποίος αποτελεί έναν από τους κύριους λόγους της επιχείρησης πραγματοποίησης αυτού του επενδυτικού σχεδίου.

VI. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] L. Gouveia, *Microalgae as a feedstock for biofuels*. Springer, 2011.
- [2] T. M. Mata, A. A. Martins, and N. S. Caetano, "Microalgae for biodiesel production and other applications: A review.," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, no. 1, pp. 217–232, Jan. 2010.
- [3] A. Y. Hoekstra, A. K. Chapagain, M. M. A. And, and M. M. Mekonnen, "The Water Footprint Assessment Manual," 2011. [Online]. Available: <http://www.waterfootprint.org/downloads/TheWaterFootprintAssessmentManual.pdf>.
- [4] J. Singh and S. Gu, "Commercialization potential of microalgae for biofuels production.," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, no. 9, pp. 2596–2610, Dec. 2010.
- [5] J. Yang, M. Xu, X. Zhang, Q. Hu, M. Sommerfeld, and Y. Chen, "Bioresource Technology Life-cycle analysis on biodiesel production from microalgae : Water footprint and nutrients balance," *Bioresource Technology*, vol. 102, no. 1, pp. 159–165, Jan. 2010.
- [6] I. Douskova, J. Doucha, K. Livansky, J. Machat, P. Novak, D. Umysova, V. Zachleder, and M. Vitova, "Simultaneous flue gas bioremediation and reduction of microalgal biomass production costs.," *Applied microbiology and biotechnology*, vol. 82, no. 1, pp. 179–85, Feb. 2009.
- [7] Y.-H. Chen, B.-Y. Huang, T.-H. Chiang, and T.-C. Tang, "Fuel properties of microalgae (*Chlorella protothecoides*) oil biodiesel and its blends with petroleum diesel," *Fuel*, vol. 94, pp. 270–273, Apr. 2012.
- [8] P. Spolaore, C. Joannis-Cassan, E. Duran, and A. Isambert, "Commercial applications of microalgae.," *Journal of bioscience and bioengineering*, vol. 101, no. 2, pp. 87–96, Feb. 2006.
- [9] M. A. Borowitzka, "Commercial production of microalgae: ponds, tanks, tubes and fermenters," *Journal of Biotechnology*, vol. 70, no. 1–3, pp. 313–321, Apr. 1999.
- [10] J. S. Burlew, *Algal culture: from laboratory to pilot plant*. Carnegie Institution of Washington, 1953.
- [11] G. Huang, F. Chen, D. Wei, X. Zhang, and G. Chen, "Biodiesel production by microalgal biotechnology," *Applied Energy*, vol. 87, no. 1, pp. 38–46, Jan. 2010.
- [12] T. L. Walker, C. Collet, and S. Purton, "Algal transgenics in the genomic era1.," *Journal of Phycology*, vol. 41, no. 6, pp. 1077–1093, Nov. 2005.
- [13] R. Radakovits, R. E. Jinkerson, A. Darzins, and M. C. Posewitz, "Genetic Engineering of Algae for Enhanced Biofuel Production.," vol. 9, no. 4, pp. 486–501, 2010.

- [14] N. M. D. Courchesne, A. Parisien, B. Wang, and C. Q. Lan, "Enhancement of lipid production using biochemical, genetic and transcription factor engineering approaches.," *Journal of biotechnology*, vol. 141, no. 1–2, pp. 31–41, Apr. 2009.
- [15] L. Meher, D. Vidyasagar, and S. Naik, "Technical aspects of biodiesel production by transesterification — a review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 10, no. 3, pp. 248–268, Jun. 2006.
- [16] J. Van Gerpen, "Biodiesel processing and production," *Fuel Processing Technology*, vol. 86, no. 10, pp. 1097–1107, Jun. 2005.
- [17] N. N. A. N. Yusuf, S. K. Kamarudin, and Z. Yaakub, "Overview on the current trends in biodiesel production," *Energy Conversion and Management*, vol. 52, no. 7, pp. 2741–2751, Jul. 2011.
- [18] A. Demirbas, "Progress and recent trends in biodiesel fuels," *Energy Conversion and Management*, vol. 50, no. 1, pp. 14–34, Jan. 2009.
- [19] M. Mittelbach and S. Gangl, "Long storage stability of biodiesel made from rapeseed and used frying oil," *Journal of the American Oil Chemists' Society*, vol. 78, no. 6, pp. 573–577, Jun. 2001.
- [20] P. Bondioli, A. Gasparoli, L. Della Bella, S. Tagliabue, and G. Toso, "Biodiesel stability under commercial storage conditions over one year," *European Journal of Lipid Science and Technology*, vol. 105, no. 12, pp. 735–741, Dec. 2003.
- [21] B. G. Subhadra and M. Edwards, "Coproduct market analysis and water footprint of simulated commercial algal biorefineries," *Applied Energy*, vol. 88, no. 10, pp. 3515–3523, Oct. 2011.
- [22] Y. Mu, H. Teng, D.-J. Zhang, W. Wang, and Z.-L. Xiu, "Microbial production of 1,3-propanediol by *Klebsiella pneumoniae* using crude glycerol from biodiesel preparations.," *Biotechnology letters*, vol. 28, no. 21, pp. 1755–9, Nov. 2006.
- [23] C. Moon, J.-H. Ahn, S. W. Kim, B.-I. Sang, and Y. Um, "Effect of biodiesel-derived raw glycerol on 1,3-propanediol production by different microorganisms.," *Applied biochemistry and biotechnology*, vol. 161, no. 1–8, pp. 502–10, May 2010.
- [24] S. S. Yazdani and R. Gonzalez, "Anaerobic fermentation of glycerol: a path to economic viability for the biofuels industry.," *Current opinion in biotechnology*, vol. 18, no. 3, pp. 213–9, Jun. 2007.
- [25] S. K. Gebauer, T. L. Psota, W. S. Harris, and P. M. Kris-Etherton, "N-3 Fatty acid dietary recommendations and food sources to achieve essentiality and cardiovascular benefits.," *The American journal of clinical nutrition*, vol. 83, no. 6 Suppl, p. 1526S–1535S, Jun. 2006.
- [26] R. Kroes, E. J. Schaefer, R. A. Squire, and G. M. Williams, "A review of the safety of DHA45-oil," *Food and Chemical Toxicology*, vol. 41, no. 11, pp. 1433–1446, Nov. 2003.

- [27] O. P. Ward and A. Singh, "Omega-3/6 fatty acids: Alternative sources of production," *Process Biochemistry*, vol. 40, no. 12, pp. 3627–3652, Dec. 2005.
- [28] E. W. Becker, "Micro-algae as a source of protein.," *Biotechnology Advances*, vol. 25, no. 2, pp. 207–210, 2007.
- [29] J. D. E. L. A. Noue and N. D. E. Pauw, "The potential of microalgal biotechnology: a review of production and uses of microalgae.," vol. 6, pp. 725–770, 1988.
- [30] L. Gouveia and J. Empis, "Relative stabilities of microalgal carotenoids in microalgal extracts, biomass and fish feed: effect of storage conditions," *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, vol. 4, no. 2, pp. 227–233, Jun. 2003.
- [31] F. X. Malcata, "Microalgae and biofuels: A promising partnership?," *Trends in biotechnology*, vol. 29, no. 11, pp. 542–9, Nov. 2011.
- [32] "AquaFUEls - Taxonomy, Biology and Biotechnology." [Online]. Available: [http://www.aquafuels.eu/attachments/079_Merged reports -Taxonomy_Biology & Biotechnology.pdf](http://www.aquafuels.eu/attachments/079_Merged%20reports%20-%20Taxonomy_Biology%20&%20Biotechnology.pdf).
- [33] "FAO. 2013. Algal Production (Growth Phases) - Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO)." [Online]. Available: <http://www.fao.org/docrep/003/W3732E/w3732e06.htm>.
- [34] C.-Y. Chen, K.-L. Yeh, R. Aisyah, D.-J. Lee, and J.-S. Chang, "Cultivation, photobioreactor design and harvesting of microalgae for biodiesel production: a critical review.," *Bioresource Technology*, vol. 102, no. 1, pp. 71–81, Jan. 2011.
- [35] G. Markou and D. Georgakakis, "Cultivation of filamentous cyanobacteria (blue-green algae) in agro-industrial wastes and wastewaters: A review.," *Applied Energy*, vol. 88, no. 10, pp. 3389–3401, Oct. 2011.
- [36] F. Delrue, P. Setier, C. Sahut, L. Cournac, A. Roubaud, G. Peltier, and A.-K. Froment, "An economic, sustainability, and energetic model of biodiesel production from microalgae.," *Bioresource Technology*, vol. 111, pp. 191–200, May 2012.
- [37] L. Xu, D. W. F. Wim Brilman, J. A. M. Withag, G. Brem, and S. Kersten, "Assessment of a dry and a wet route for the production of biofuels from microalgae: energy balance analysis.," *Bioresource Technology*, vol. 102, no. 8, pp. 5113–5122, Apr. 2011.
- [38] T. Takeshita, "Competitiveness, role, and impact of microalgal biodiesel in the global energy future," *Applied Energy*, vol. 88, no. 10, pp. 3481–3491, Oct. 2011.
- [39] R. Harun, M. Davidson, M. Doyle, R. Gopiraj, M. Danquah, and G. Forde, "Technoeconomic analysis of an integrated microalgae photobioreactor, biodiesel and biogas production facility," *Biomass and Bioenergy*, vol. 35, no. 1, pp. 741–747, Jan. 2011.
- [40] A. Darzins, P. Pienkos, and L. Edye, "Current status and potential for algal biofuels production.," *National Renewable Energy Laboratory NREL A Report to Bioenergy Task 39*, vol. Report T39, no. August, p. 146, 2010.

- [41] "SolarGIS - Online data and tools for solar energy projects (solargis.info)." [Online]. Available: <http://solargis.info>.
- [42] A. Converti, A. A. Casazza, E. Y. Ortiz, P. Perego, and M. Del Borghi, "Effect of temperature and nitrogen concentration on the growth and lipid content of *Nannochloropsis oculata* and *Chlorella vulgaris* for biodiesel production," *Chemical Engineering and Processing Process Intensification*, vol. 48, no. 6, pp. 1146–1151, Jun. 2009.
- [43] R. Muñoz and B. Guieysse, "Algal-bacterial processes for the treatment of hazardous contaminants: a review.," *Water research*, vol. 40, no. 15, pp. 2799–815, Aug. 2006.
- [44] Γεώργιος Π. Μίγγιρος, "Όρθολογική διαχείριση των υδάτινων πόρων στη γεωργία με χρήση νέων τεχνολογιών." [Online]. Available: http://library.tee.gr/digital/m2583/m2583_migiros.pdf.
- [45] "AquaFUEls - Life-Cycle Assessment and Environmental Assessment." [Online]. Available: [http://www.aquafuels.eu/attachments/079_D 3.3-3.5 Life-Cycle Assessment and Environmental Assessment.pdf](http://www.aquafuels.eu/attachments/079_D%203.3-3.5%20Life-Cycle%20Assessment%20and%20Environmental%20Assessment.pdf).
- [46] "European Soil Portal." [Online]. Available: <http://eusoils.jrc.ec.europa.eu/>.
- [47] P. M. Slegers, R. H. Wijffels, G. Van Straten, and A. J. B. Van Boxtel, "Design scenarios for flat panel photobioreactors," *Applied Energy*, vol. 88, no. 10, pp. 3342–3353, Oct. 2011.
- [48] T. J. Lundquist, I. C. Woertz, N. W. T. Quinn, and J. R. Benemann, "A realistic technology and engineering assessment of algae biofuel production.," *Energy*, no. October, 2010.
- [49] L. B. Brentner, M. J. Eckelman, and J. B. Zimmerman, "Combinatorial life cycle assessment to inform process design of industrial production of algal biodiesel.," *Environmental science & technology*, vol. 45, no. 16, pp. 7060–7, Aug. 2011.
- [50] "The European Pollutant Release and Transfer Register." [Online]. Available: <http://prtr.ec.europa.eu/>.
- [51] Y. Li, M. Horsman, N. Wu, C. Q. Lan, and N. Dubois-calero, "Articles : Biocatalysts and Bioreactor Design," *International Journal*, vol. 24, no. 1, pp. 815–820, 2008.
- [52] "CARMA - Carbon Monitoring for Action." [Online]. Available: <http://carma.org/>.
- [53] A. Kumar, S. Ergas, X. Yuan, A. Sahu, Q. Zhang, J. Dewulf, F. X. Malcata, and H. Van Langenhove, "Enhanced CO₂ fixation and biofuel production via microalgae: recent developments and future directions.," *Trends in biotechnology*, vol. 28, no. 7, pp. 371–80, Jul. 2010.
- [54] J. N. Lee, J. S. Lee, C. S. Shin, S. C. Park, and S. W. Kim, "Methods to enhance tolerances of *Chlorella* KR-1 to toxic compounds in flue gas.," *Applied biochemistry and biotechnology*, vol. 84–86, no. x, pp. 329–42, Jan. 2000.

- [55] Ευθύμιος Νταρακάς, “Διεργασίες επεξεργασίας υγρών αποβλήτων.” [Online]. Available: <http://users.auth.gr/darakas/DEYA.pdf>.
- [56] L. Christenson and R. Sims, “Production and harvesting of microalgae for wastewater treatment, biofuels, and bioproducts.,” *Biotechnology advances*, vol. 29, no. 6, pp. 686–702, 2011.
- [57] R. Slade and A. Bauen, “Micro-algae cultivation for biofuels: Cost, energy balance, environmental impacts and future prospects.,” *Biomass and Bioenergy*, vol. 44, no. 0, pp. 1–10, Jan. 2013.
- [58] L. E. González, R. O. Cañizares, and S. Baena, “Efficiency of ammonia and phosphorus removal from a Colombian agroindustrial wastewater by the microalgae *Chlorella vulgaris* and *Scenedesmus dimorphus*.,” *Bioresource Technology*, vol. 60, no. 3, pp. 259–262, Jun. 1997.
- [59] “Οδηγός εκτατικών διαδικασιών καθαρισμού ακάθαρτων υδάτων.” [Online]. Available: http://ec.europa.eu/environment/water/water-urbanwaste/info/pdf/waterguide_el.pdf.
- [60] “Ανακοίνωση προσωρινών αποτελεσμάτων απογραφής πληθυσμού 2011 - Ελληνική Στατιστική Αρχή.” [Online]. Available: http://www.statistics.gr/portal/page/portal/ESYE/BUCKET/General/A1602_SAM01_DT_DC_00_2011_01_F_GR.pdf.
- [61] J. N. Rosenberg, A. Mathias, K. Korth, M. J. Betenbaugh, and G. a Oyler, “Microalgal biomass production and carbon dioxide sequestration from an integrated ethanol biorefinery in Iowa: A technical appraisal and economic feasibility evaluation,” *Biomass and Bioenergy*, vol. 35, no. 9, pp. 3865–3876, Oct. 2011.
- [62] R. Harun, M. Singh, G. M. Forde, and M. K. Danquah, “Bioprocess engineering of microalgae to produce a variety of consumer products.,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, no. 3, pp. 1037–1047, Apr. 2010.
- [63] W. Zhiyou and M. B. Johnson, “Microalgae as a feedstock for biofuel production.,” 2009.
- [64] “FAO. 2009. Algae-Based Biofuels: A Review of Challenges and Opportunities for Developing Countries May - Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO).,” no. May, 2009.
- [65] I. Doušková, F. Kaštánek, Y. Maléterová, P. Kaštánek, J. Doucha, and V. Zachleder, “Utilization of distillery stillage for energy generation and concurrent production of valuable microalgal biomass in the sequence: Biogas-cogeneration-microalgae-products,” *Energy Conversion and Management*, vol. 51, no. 3, pp. 606–611, Mar. 2010.
- [66] R. Davis, A. Aden, and P. T. Pienkos, “Techno-economic analysis of autotrophic microalgae for fuel production,” *Applied Energy*, vol. 88, no. 10, pp. 3524–3531, Oct. 2011.

- [67] J. C. M. Pires, M. C. M. Alvim-Ferraz, F. G. Martins, and M. Simões, "Carbon dioxide capture from flue gases using microalgae: Engineering aspects and biorefinery concept," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, no. 5, pp. 3043–3053, Jun. 2012.
- [68] Y. Chisti, "Biodiesel from microalgae.," *Biotechnology Advances*, vol. 25, no. 3, pp. 294–306, 2007.
- [69] J. R. Benemann, "Overview: Algae oil to biofuels (annotated presentation). Abstract – a short history of algae biofuels," no. 925, 2008.
- [70] N. Moazami, A. Ashori, R. Ranjbar, M. Tangestani, R. Eghtesadi, and A. S. Nejad, "Large-scale biodiesel production using microalgae biomass of *Nannochloropsis*.,," *Biomass and Bioenergy*, vol. 39, pp. 449–453, Apr. 2012.
- [71] E. Molina Grima, E.-H. Belarbi, F. G. Ación Fernández, a Robles Medina, and Y. Chisti, "Recovery of microalgal biomass and metabolites: process options and economics.,," *Biotechnology advances*, vol. 20, no. 7–8, pp. 491–515, Jan. 2003.
- [72] J. J. Milledge and S. Heaven, "A review of the harvesting of micro-algae for biofuel production.,," pp. 165–178, 2013.
- [73] I. Rawat, R. R. Kumar, T. Mutanda, and F. Bux, "Biodiesel from microalgae: A critical evaluation from laboratory to large scale production.,," *Applied Energy*, vol. 103, pp. 444–467, 2013.
- [74] R. Divakaran and V. N. S. Pillai, "Flocculation of algae using chitosan.,," pp. 419–422, 2003.
- [75] S. Pal, D. Mal, and R. P. Singh, "Cationic starch: an effective flocculating agent.,," *Carbohydrate Polymers*, vol. 59, no. 4, pp. 417–423, Mar. 2005.
- [76] A. Singh, P. S. Nigam, and J. D. Murphy, "Mechanism and challenges in commercialisation of algal biofuels.,," *Bioresource Technology*, vol. 102, no. 1, pp. 26–34, Jan. 2011.
- [77] H. D. Kumar, P. K. Yadava, and J. P. Gaur, "Electrical flocculation of the unicellular green alga," *Aquatic Botany*, vol. 11, 1981.
- [78] S. Salim, R. Bosma, M. H. Vermuë, and R. H. Wijffels, "Harvesting of microalgae by bio-flocculation.,," *Journal of applied phycology*, vol. 23, no. 5, pp. 849–855, Oct. 2011.
- [79] L. Xu, C. Guo, F. Wang, S. Zheng, and C.-Z. Liu, "A simple and rapid harvesting method for microalgae by in situ magnetic separation.,," *Bioresource technology*, vol. 102, no. 21, pp. 10047–51, Nov. 2011.
- [80] Y.-R. Hu, F. Wang, S.-K. Wang, C.-Z. Liu, and C. Guo, "Efficient harvesting of marine microalgae *Nannochloropsis maritima* using magnetic nanoparticles.,," *Bioresource technology*, vol. 138, pp. 387–90, Jun. 2013.

- [81] G. Prochazkova, I. Safarik, and T. Branyik, "Harvesting microalgae with microwave synthesized magnetic microparticles.," *Bioresource technology*, vol. 130, pp. 472–7, Feb. 2013.
- [82] "Bioenergy - Los Alamos National Laboratory." [Online]. Available: <http://www.lanl.gov/science-innovation/capabilities/bioscience-biosecurity-health/bioenergy/index.php>.
- [83] "Los Alamos's magnetic algae project so far successful - Biofuels Digest." [Online]. Available: <http://www.biofuelsdigest.com/bdigest/2011/10/21/los-alamoss-magnetic-algae-project-so-far-successful/>.
- [84] "DOE Pulse - Science and Technology Highlights from the DOE National Laboratories." [Online]. Available: <http://www.ornl.gov/info/news/pulse/no348/story3.shtml>.
- [85] R. Bosma, W. A. Van Spronsen, J. Tramper, and R. H. Wijffels, "Ultrasound, a new separation technique to harvest microalgae.," pp. 143–153, 2003.
- [86] A. Singh and S. I. Olsen, "A critical review of biochemical conversion, sustainability and life cycle assessment of algal biofuels.," *Applied Energy*, vol. 88, no. 10, pp. 3548–3555, Oct. 2011.
- [87] R. Halim, M. K. Danquah, and P. A. Webley, "Extraction of oil from microalgae for biodiesel production: A review.," *Biotechnology Advances*, vol. 30, no. 3, pp. 709–32, 2012.
- [88] M. Ahii, A. Teresa, M. Grac, G. Melão, and C. C. Parrish, "Lipid composition of *Chlorella vulgaris* (Trebouxiophyceae) as a function of different cadmium and phosphate concentrations," vol. 129, pp. 171–182, 2013.
- [89] H. M. Amaro, A. C. Guedes, and F. X. Malcata, "Advances and perspectives in using microalgae to produce biodiesel.," *Applied Energy*, vol. 88, no. 10, pp. 3402–3410, Oct. 2011.
- [90] C. M. Beal, C. H. Smith, M. E. Webber, R. S. Ruoff, and R. E. Hebner, "A framework to report the production of renewable diesel from algae.," *BioEnergy Research*, vol. 4, no. 1, pp. 36–60, Aug. 2010.
- [91] P. Taylor, "Microalgal biomass drying by a simple solar device.," *International Journal of Solar Energy*, no. May 2013, pp. 37–41, 2007.
- [92] Y. Chisti and M. Moo-Young, "Disruption of microbial cells for intracellular products.," *Enzyme and Microbial Technology*, vol. 8, no. 4, pp. 194–204, Apr. 1986.
- [93] M. K. Lam and K. T. Lee, "Microalgae biofuels: A critical review of issues, problems and the way forward.," *Biotechnology Advances*, vol. 30, no. 3, pp. 673–90, 2012.
- [94] A. Carrero, G. Vicente, R. Rodríguez, M. Linares, and G. L. del Peso, "Hierarchical zeolites as catalysts for biodiesel production from *Nannochloropsis* microalga oil.," *Catalysis Today*, vol. 167, no. 1, pp. 148–153, Jun. 2011.

- [95] Y. Li, S. Lian, D. Tong, R. Song, W. Yang, Y. Fan, R. Qing, and C. Hu, "One-step production of biodiesel from *Nannochloropsis* sp. on solid base Mg–Zr catalyst," *Applied Energy*, vol. 88, no. 10, pp. 3313–3317, Oct. 2011.
- [96] B. Sialve, N. Bernet, and O. Bernard, "Anaerobic digestion of microalgae as a necessary step to make microalgal biodiesel sustainable.," *Biotechnology Advances*, vol. 27, no. 4, pp. 409–416, 2009.
- [97] E. A. Ehimen, Z. F. Sun, C. G. Carrington, E. J. Birch, and J. J. Eaton-Rye, "Anaerobic digestion of microalgae residues resulting from the biodiesel production process.," *Applied Energy*, vol. 88, no. 10, pp. 3454–3463, Oct. 2011.
- [98] "Φόρο άνθρακα επιβάλλει στις ρυπογόνες επιχειρήσεις η Αυστραλία - Ειδήσεις - Επιστήμη-Τεχνολογία - in.gr." [Online]. Available: <http://news.in.gr/science-technology/article/?aid=1231117203>.
- [99] "Energy Taxes - Global Policy Forum." [Online]. Available: <http://www.globalpolicy.org/social-and-economic-policy/global-taxes-1-79/energy-taxes.html>.
- [100] "EUROPA - PRESS RELEASES - Press Release - Φορολογία επί της ενέργειας: Η Επιτροπή προωθεί την ενεργειακή αποδοτικότητα και φιλικότερα προς το περιβάλλον προϊόντα." [Online]. Available: http://europa.eu/rapid/press-release_IP-11-468_el.htm#PR_metaPressRelease_bottom.
- [101] "EUROPA - PRESS RELEASES - Press Release - Revision of the Energy Taxation Directive – Questions and Answers." [Online]. Available: http://europa.eu/rapid/press-release_MEMO-11-238_en.htm?locale=en.
- [102] "AquaFUELS - Economic assessment." [Online]. Available: http://www.aquafuels.eu/attachments/079_D 3.6 Economic assessment.pdf.
- [103] J. W. Richardson and J. L. Outlaw, "The economics of microalgae oil.," *Biomass*, vol. 13, no. 2, pp. 119–130, 2010.
- [104] H. H. Khoo, P. N. Sharratt, P. Das, R. K. Balasubramanian, P. K. Naraharisetti, and S. Shaik, "Life cycle energy and CO₂ analysis of microalgae-to-biodiesel: preliminary results and comparisons.," *Bioresource Technology*, vol. 102, no. 10, pp. 5800–5807, May 2011.
- [105] C. Zamalloa, E. Vulsteke, J. Albrecht, and W. Verstraete, "The techno-economic potential of renewable energy through the anaerobic digestion of microalgae.," *Bioresource technology*, vol. 102, no. 2, pp. 1149–58, Jan. 2011.
- [106] M. K. Lam, K. T. Lee, and A. R. Mohamed, "Current status and challenges on microalgae-based carbon capture.," *International Journal of Greenhouse Gas Control*, vol. 10, pp. 456–469, Sep. 2012.
- [107] "PV potential estimation utility - EU." [Online]. Available: <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php>.

- [108] “Δημοσια, Ανοικτά Γεωχωρικά Δεδομένα Δημόσιας Διοίκησης.” [Online]. Available: <http://geodata.gov.gr/geodata/>.
- [109] “6η Εθνική Έκθεση (Έτους 2009) Σχετικά με την Προώθηση της Χρήσης των Βιοκαυσίμων ή Άλλων Ανανεώσιμων Καυσίμων για Μεταφορές στην Ελλάδα την Περίοδο 2005-2010 (Άρθρο 4 της Οδηγίας 2003/30/ΕΚ) - Υπουργείο Περιβάλλοντος, Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής (ΥΠΕ.” [Online]. Available: <http://www.ypeka.gr/LinkClick.aspx?fileticket=kVL3DzJ101U=&tabid=292>.
- [110] “ΔΕΗ Α.Ε. - Περιβαλλοντική Στρατηγική.” [Online]. Available: <http://www.dei.gr/Default.aspx?id=31378&nt=19&lang=1>.
- [111] “ΔΕΗ Α.Ε. - Με σεβασμό στο Περιβάλλον και τον Άνθρωπο - 2011.” [Online]. Available: <http://www.dei.gr/Default.aspx?id=48593&nt=18&lang=1>.
- [112] “ΔΕΗ Α.Ε. - Απολογισμός Εταιρικής Κοινωνικής Ευθύνης και Βιώσιμης Ανάπτυξης 2010.” [Online]. Available: <http://www.dei.gr/Default.aspx?id=54074&nt=18>.
- [113] “FAO. 2013. AQUASTAT database - Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO).” [Online]. Available: <http://www.fao.org/nr/water/aquastat/data/query/results.html>.
- [114] “ΔΕΗ ΑΕ - Γενικό τιμολόγιο ΜΤ Βιομηχανικό 2012.” [Online]. Available: <http://www.dei.gr/Documents2/TIMΟΛ 10 2012/Γενικό τιμολόγιο ΜΤ Βιομηχανικό 2012.pdf>.
- [115] “Inflation Calculator: U.S. Bureau of Labor Statistics.” [Online]. Available: http://www.bls.gov/data/inflation_calculator.htm.
- [116] “XE - The World’s Favorite Currency and Foreign Exchange Site.” [Online]. Available: <http://www.xe.com/>.
- [117] W. J. Oswald and J. R. Benemann, “Systems and economic analysis of microalgae ponds for conversion of CO₂ to biomass.,” 1996.

VII. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Περιεχόμενο διαφόρων ειδών μικροφυκών σε αμινοξέα και σύγκριση με τιμές αναφοράς μίας καλά ισορροπημένης πρωτεΐνης με βάση τον οργανισμό WHO/FAO

Πηγή	WHO /FAO	Αυγό	Σόγια	Chlorella Vulgaris	Dunaliella bardawil	Scenedesmus obliquus	Arthrospira Maxima	Spirulina platensis	Aphanizomenon sp.
Ile	4,0	6,6	5,3	3,8	4,2	3,6	6,0	6,7	2,9
Leu	7,0	8,8	7,7	8,8	11,0	7,3	8,0	9,8	5,2
Val	5,0	7,2	5,3	5,5	5,8	6,0	6,5	7,1	3,2
Lys	5,5	5,3	6,4	8,4	7,0	5,6	4,6	4,8	3,5
Phe		5,8	5,0	5,0	5,8	4,8	4,9	5,3	2,5
	6,0								
Tyr		4,2	3,7	3,4	3,7	3,2	3,9	5,3	-
Met	3,5	3,2	1,3	2,2	2,3	1,5	1,4	2,5	0,7
Cys	1,0	2,3	1,9	1,4	1,2	0,6	0,4	0,9	0,2
Try		1,7	1,4	2,1	0,7	0,3	1,4	0,3	0,7
Thr		5,0	4,0	4,8	5,4	5,1	4,6	6,2	3,3
Ala		-	5,0	7,9	7,3	9,0	6,8	9,5	4,7
Arg		6,2	7,4	6,4	7,3	7,1	6,5	7,3	3,8
Asp		11,0	1,3	9,0	10,4	8,4	8,6	11,8	4,7
Glu		12,6	19,0	11,6	12,7	10,7	12,6	10,3	7,8
Gly		4,2	4,5	5,8	5,5	7,1	4,8	5,7	2,9
His		2,4	2,6	2,0	1,8	2,1	1,8	2,2	0,9
Pro		4,2	5,3	4,8	3,3	3,9	3,9	4,2	2,9
Ser		6,9	5,8	4,1	4,6	3,8	4,2	5,1	2,9

Πίνακας Π.1 [28]

Δεδομένα Παραμέτρων BV, DC, NPU, PER για τη θρεπτική αξία των πρωτεϊνών

Είδος	Επεξεργασία	BV	DC	NPU	PER
Καζεΐνη		87,8	95,1	83,4	2,50
Αυγό		94,7	94,2	89,1	-
<i>Scenedesmus obliquus</i>	Ξήρανση σε Δοχείο	75,0	88,0	67,3	1,99
<i>Scenedesmus obliquus</i>	Ηλιακή Ξήρανση Υποβοηθούμενη	72,1	72,5	52,0	1,14
<i>Scenedesmus obliquus</i>	ΗΞ	71,9	77,1	55,5	1,20
<i>Chlorella sp.</i>	Ξήρανση με Αέρα	52,9	59,4	31,4	0,84
<i>Chlorella sp.</i>	Ξήρανση σε Δοχείο	76,6	89,0	68,0	2,00
<i>Coelastrum phoboscideum</i>	Ξήρανση σε Δοχείο	76,0	88,0	68,0	2,10

<i>Spirulina sp.</i>	Ηλιακή Ξήρανση	77,6	83,9	65,0	1,78
<i>Spirulina sp.</i>	Ξήρανση σε Δοχείο	68,0	75,5	52,7	2,10

Πίνακας Π.2 [28]

Στοιχειακή Ανάλυση *Chlorella sp.*

Στοιχείο	mg/ 100 g ξηρής βιομάζας
P	1200
K	879
S	600
Mg	300
Ca	230
Fe	70
Mn	14
Zn	11
Cu	4
Co	0,5

Πίνακας Π.3 [32]

Περιεχόμενο *Chlorella sp.* σε Βιταμίνες

Βιταμίνες (mg/kg)	Ξηρό Βάρος <i>Chlorella</i>
β1 – θιαμίνη	18
β2 – ριβοφλαβίνη	44
β3 - νικοτεϊνικό οξύ (niacin)	219
β5 - παντοθενικό οξύ	13
β6 – πυρηδοξίνη	28
β12 – κοβαλαμίνη	0,8
βιοτίνη (βιταμίνη H)	0,3
φολικό οξύ	42
βιταμίνη E	298
βιταμίνη C	655
β-καροτίνη (προβιταμίνη A)	1050

Πίνακας Π.4 [32]

Κατανάλωση Ηλεκτρισμού από Διάφορες Πηγές Τεχνητού Φωτισμού

Πηγή Φωτός	Σταθερότητα Λειτουργίας	Κατανάλωση Ηλεκτρισμού (kWh)
Συμβατικές Πηγές Τεχνητού Φωτός	Υψηλή	40.32
LED	Υψηλή	20.16
OFMH (Διέγερση Οπτικών Ινών με Λάμπα Μετάλλου-Αλογόνου)	Μέση	36.0
OF-Solar (Διέγερση Οπτικών Ινών με Ηλιακή Ενέργεια)	Χαμηλή	1.0
LED/OF-Solar συνδυασμένο με αιολική ενέργεια/φωτοβολταϊκά	Υψηλή	0

Πίνακας Π.5 [34]

Στοιχεία μονάδων της ΔΕΗ για το CO₂

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται στοιχεία σχετικά με τη δραστηριότητα της Δημόσιας Επιχείρησης Ηλεκτρισμού (ΔΕΗ) στον παραγωγικό τομέα. Αυτή η ανάλυση κρίνεται αναγκαία, διότι η ΔΕΗ παράγει CO₂ το οποίο μπορεί να αξιοποιηθεί από την καλλιέργεια για την ανάπτυξη των μικροφυκών. Επίσης, γίνεται αναφορά στα υγρά απόβλητα των μονάδων της ΔΕΗ, τα οποία αποτελούν εν δυνάμει τροφοδοσία της καλλιέργειας των μικροφυκών. [110]

Η ΔΕΗ με αριθμούς

- 7,5 εκατομμύρια πελάτες
- 109 σταθμοί παραγωγής
- 12.760 MW εγκατεστημένη ισχύς
- 70% της εγκατεστημένης ισχύος στην Ελλάδα
- 11.229 χλμ. γραμμές Μεταφοράς (Υψηλής Τάσης)
- 228.900 χλμ. γραμμές Διανομής Χαμηλής και Μέσης Τάσης και 949 χλμ γραμμές Υψηλής Τάσης

Η δραστηριότητα της ΔΕΗ

Η ΔΕΗ Α.Ε. είναι η μεγαλύτερη εταιρεία παραγωγής και προμήθειας ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα, με περίπου 7,5 εκατομμύρια πελάτες. Η ΔΕΗ διαθέτει σήμερα μια μεγάλη υποδομή σε εγκαταστάσεις ορυχείων λιγνίτη, παραγωγής, μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Κατέχει περίπου το 70% της εγκατεστημένης ισχύος των σταθμών ηλεκτροπαραγωγής στην Ελλάδα συμπεριλαμβάνοντας στο ενεργειακό της μίγμα λιγνιτικούς, υδροηλεκτρικούς και πετρελαϊκούς σταθμούς, καθώς και σταθμούς φυσικού αερίου, αλλά και μονάδες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ). Στον τομέα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, η ΔΕΗ δραστηριοποιείται μέσω της θυγατρικής της «ΔΕΗ

Ανανεώσιμες Α.Ε.», έχοντας στο χαρτοφυλάκιό της 22 αιολικά πάρκα, 12 μικρούς υδροηλεκτρικούς σταθμούς και 12 φωτοβολταϊκούς, συνολικής εγκατεστημένης ισχύος 132 MW (συμπεριλαμβανομένων και 9 σταθμών στους οποίους η ΔΕΗ Ανανεώσιμες συμμετέχει μέσω κοινοπραξιών). Στην ηπειρωτική Ελλάδα, το μέγιστο της παραγωγικής ισχύος είναι συγκεντρωμένο στο βόρειο τμήμα της χώρας κοντά στα μεγάλα λιγνιτωρυχεία, τα οποία αποτελούν την κυριότερη πηγή καυσίμου. Στα νησιά, η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας εξαρτάται από την απόσταση των νησιών από την ηπειρωτική Ελλάδα, και συνεπώς από τη δυνατότητα σύνδεσής τους με το σύστημα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας της ηπειρωτικής Ελλάδας. Τα νησιά του Ιονίου, όπως επίσης και ορισμένα του Αιγαίου, είναι συνδεδεμένα με το Σύστημα Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας της ηπειρωτικής Ελλάδας και μαζί με το Σύστημα αυτό αποτελούν το «Διασυνδεδεμένο Σύστημα». Τα υπόλοιπα νησιά, τα οποία αναφέρονται ως «Μη Διασυνδεδεμένα Νησιά», εξυπηρετούνται από αυτόνομους σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, οι οποίοι λειτουργούν με πετρέλαιο. Συμπληρωματικά σε ορισμένα νησιά η ζήτηση καλύπτεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Οι μεγαλύτεροι σταθμοί παραγωγής στα Μη Διασυνδεδεμένα Νησιά βρίσκονται στην Κρήτη και τη Ρόδο (με συνολική ισχύ θερμικών σταθμών μεγαλύτερη των 1000 MW). Η παραγωγή της ΔΕΗ μαζί με εισαγωγές, κάλυψαν το 70,1% της συνολικής ζήτησης το 2011. Επιπρόσθετα η εταιρεία εισήγαγε 1,8 TWh για την κάλυψη των αναγκών των πελατών της. Μετά την απόσχιση των κλάδων Μεταφοράς και Διανομής, δημιουργήθηκαν δύο 100% θυγατρικές εταιρείες της ΔΕΗ Α.Ε., ο ΑΔΜΗΕ Α.Ε. (Ανεξάρτητος Διαχειριστής Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας Α.Ε.) και ο ΔΕΔΔΗΕ Α.Ε. (Διαχειριστής Ελληνικού Δικτύου Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας Α.Ε.). Ο ΑΔΜΗΕ Α.Ε. έχει την ευθύνη της διαχείρισης, λειτουργίας, ανάπτυξης και συντήρησης του Ελληνικού Συστήματος Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας και των διασυνδέσεών του, ενώ ο ΔΕΔΔΗΕ Α.Ε. έχει την ευθύνη για την διαχείριση, ανάπτυξη, λειτουργία και συντήρηση του Ελληνικού Δικτύου Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας. [110]

Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται βασικά στοιχεία σχετικά με τη λειτουργική δραστηριότητα της εταιρίας κατά την τελευταία τριετία. [111]

31η Δεκεμβρίου	2011	2010	2009
Εγκατεστημένη ισχύς (GW)	12,8	12,8	12,8
Καθαρή Παραγωγή (TWh) ⁽¹⁾	41,5	45,5	50,1
Πωληθείσα Ηλεκτρική Ενέργεια στους τελικούς καταναλωτές (TWh) ⁽²⁾	49,3	51,6	53
Πελάτες στο τέλος της περιόδου (σε εκατ.)	7,3 ⁽³⁾	7,5	7,6
Αριθμός εργαζομένων ⁽⁴⁾	20.821	21.845	22.582
Πελάτες ανά εργαζόμενο	351	343	335
Πωλήσεις ανά εργαζόμενο (MWh)	2.368	2.362	2.349

(1) Η καθαρή παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ισούται με τη συνολική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, μείον την εσωτερική κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας που οφείλεται στη διαδικασία παραγωγής.

(2) Συμπεριλαμβάνονται οι πωλήσεις στην εγχώρια αγορά και οι εξαγωγές.

(3) 7,5 εκατ. πελάτες μετά την αναστολή λειτουργίας δύο εναλλασσικών προμηθευτών από 24.1.2012.

(4) Δεν συμπεριλαμβάνονται οι εργαζόμενοι στη ΔΕΣΜΗΕ Α.Ε.

Το 2011, η παραχθείσα από τη ΔΕΗ ηλεκτρική ενέργεια προήλθε από λιγνίτη (66,4%), πετρέλαιο (11,5%), φυσικό αέριο (12,6%), υδροηλεκτρικά (8,9%) και ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (0,6%).

Πίνακας Π.6

Οι εκπομπές CO₂ της ΔΕΗ

Η κλιματική αλλαγή και η αύξηση της μέσης θερμοκρασίας του πλανήτη συνδέονται με ένα ευρύ φάσμα επιπτώσεων. Σύμφωνα με το πρωτόκολλο του Κιότο, τα κράτη μέλη της ΕΕ έχουν δεσμευθεί να μειώσουν τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου κατά 8% μέχρι το 2012 (από το επίπεδο που καταγράφηκε το 1990). Για την αντιμετώπιση των θεμάτων που αφορούν στην κλιματική αλλαγή και με στόχο την εξασφάλιση της βιώσιμης ανάπτυξής μας, ακολουθούμε μια ολοκληρωμένη ενεργειακή στρατηγική, η οποία, μεταξύ άλλων, περιλαμβάνει τον περιορισμό των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (CO₂), συμβάλλοντας στην επίτευξη των στόχων της ενεργειακής πολιτικής της ΕΕ και του ΥΠΕΚΑ για το 2020. Ως αποτέλεσμα της ενεργειακής στρατηγικής της ΔΕΗ και της αυξανόμενης διείσδυσης, τόσο του φυσικού αερίου, όσο και των ΑΠΕ στο μίγμα καυσίμου της ηλεκτροπαραγωγής, οι ετήσιες εκπομπές CO₂ της ΔΕΗ, από το έτος που ξεκίνησε το Ευρωπαϊκό Σύστημα Εμπορίας Δικαιωμάτων Εκπομπών (EU ETS), έχουν σταθερά πτωτική τάση. [112]

Στοιχεία εκπομπών CO₂ για το 2010

ΕΙΔΟΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ	ΕΚΠΟΜΠΕΣ CO ₂ (τόνοι)	ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ (MWh)	ΤΟΝΟΙ CO ₂ ΑΝΑ MWh
Λιγνιτικές	39.679.674		
Μαζούι	2.975.218	42.243.916	
Ντιζέλ	906.124		
Αποθείωσης (FGD)	134.979		
Φυσικού αερίου	2.732.732		1,021
Μονάδες εκτός συστήματος EU ETS	70.880	93.001	
Μονάδες ΑΠΕ*	0	3.194.683	
Σύνολο	46.499.607	45.531.600	

* ΥΗΣ, ΜΥΗΣ, αολικά πάρκα, φωτοβολταϊκά. Περιλαμβάνονται και οι μονάδες της ΔΕΗ Ανανεώσιμες

Πίνακας Π.7

Όπως φαίνεται και από τον παραπάνω πίνακα, οι συνολικές εκπομπές CO₂ της ΔΕΗ ανέρχονται σε 46.499.607 τόνους σε ετήσια βάση. Αυτή η ποσότητα CO₂ μπορεί να αξιοποιηθεί από την καλλιέργεια. Με αυτόν τον τρόπο, το CO₂ δεσμεύεται για χρήση με στόχο την παραγωγή μικροφυκών, οπότε δεν επιβαρύνει το περιβάλλον με αποτέλεσμα τη μερική αντιμετώπιση φαινομένων όπως αυτό του θερμοκηπίου. [112]

Τέλος, με τη χρήση υδροηλεκτρικών σταθμών για την παραγωγή ενέργειας, μειώνονται σημαντικά οι ρύποι CO₂ στην ατμόσφαιρα, αφού σε περιόδους κατά τις οποίες υπάρχουν επαρκή υδατικά αποθέματα η ηλεκτροπαραγωγή από τους υδροηλεκτρικούς σταθμούς υποκαθιστά την ηλεκτροπαραγωγή από τους θερμοηλεκτρικούς σταθμούς (κυρίως του φυσικού αερίου, αλλά και τους λιγνιτικούς κατά μικρότερο ποσοστό). [112]

- Κατανομή δικαιωμάτων εκπομπών CO₂

Για την επίτευξη του στόχου της μείωσης των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, η ΕΕ, μεταξύ άλλων, αναθεώρησε το EU ETS, σε ότι αφορά τις εταιρείες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Οι ηλεκτροπαραγωγοί θα είναι πλέον υποχρεωμένοι, από το έτος 2013 και μετά, να αγοράζουν το σύνολο των εκπομπών τους σε δημοπρασίες που διενεργούν τα Κράτη Μέλη. Με αυτή την αφετηρία, η προσπάθεια που πρέπει να καταβληθεί για τη μείωση των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου στις εγκαταστάσεις των ηλεκτρικών εταιρειών της ΕΕ, θα πρέπει να γίνει πιο έντονη και συστηματική. [112]

Οι θερμικές εγκαταστάσεις της ΔΕΗ (θερμοηλεκτρικοί σταθμοί) με θερμική ισχύ μεγαλύτερη των 20MW, εμπίπτουν στο EU ETS. Το EU ETS θεσπίστηκε στην Ευρωπαϊκή Ένωση με τις Οδηγίες 2003/87/ΕΚ και 2004/101/ΕΚ, οι οποίες ενσωματώθηκαν στην Ελληνική Νομοθεσία με τις ΚΥΑ 54409/2632/2004 και 9267/468/2007. [112]

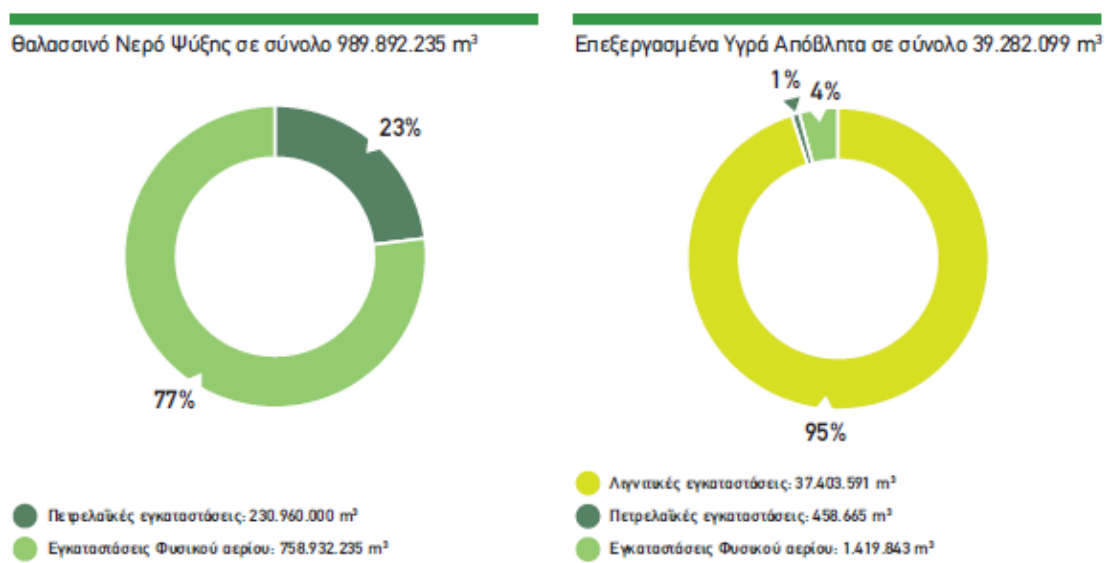
Κάθε υπόχρεη εγκατάσταση (για την ηλεκτροπαραγωγή: κάθε εγκατάσταση ονομαστικής θερμικής ισχύος μεγαλύτερης ή ίσης των 20MW) οφείλει να περιορίσει τις ετήσιες εκπομπές CO₂ στα επίπεδα που της έχει ορίσει το Εθνικό Σχέδιο Κατανομής Δικαιωμάτων Εκπομπών. Σε περίπτωση υπέρβασης, μπορεί να χρησιμοποιήσει τους «ευέλικτους μηχανισμούς» προκειμένου να καλύψει με αγορές δικαιωμάτων το έλλειμά της. Οι «ευέλικτοι μηχανισμοί» περιλαμβάνουν (α) την αγορά δικαιωμάτων εκπομπών από άλλες υπόχρεες εγκαταστάσεις της ΕΕ, οι οποίες έχουν περίσσεια δικαιωμάτων εκπομπών (τα δικαιώματα εκπομπών αυτού του τύπου ονομάζονται European Union Allowances - EUA) και (β) την αγορά δικαιωμάτων εκπομπών από έργα CDM και JI. [112]

Τα υγρά απόβλητα και οι εκροές και απορρίψεις νερού της ΔΕΗ

Όλοι οι σταθμοί παραγωγής ενέργειας της ΔΕΗ διαθέτουν σύγχρονα συστήματα κατεργασίας των υγρών αποβλήτων τους, σύμφωνα με τα προβλεπόμενα στις αποφάσεις ΕΠΟ κάθε εγκατάστασης, καθώς και με το Εγχειρίδιο Βέλτιστων Διαθέσιμων Τεχνικών για τις Μεγάλες Εγκαταστάσεις Καύσης. Οι απορρίψεις του νερού και των επεξεργασμένων υδατικών αποβλήτων γίνονται πάντα σύμφωνα με τις ΚΥΑ ΕΠΟ των ΑΗΣ. [112]

Στο πρώτο διάγραμμα δίνονται οι ποσότητες θαλασσινού νερού που χρησιμοποιούνται για ψύξη στους σταθμούς της ΔΕΗ στο Διασυνδεδεμένο Σύστημα και στα νησιά Κρήτη και Ρόδο και εκτιμώνται βάσει της δυναμικότητας των αντλιών σε μέγιστη φόρτιση των μονάδων και των ωρών λειτουργίας τους. [112]

Στο δεύτερο διάγραμμα δίνονται οι ποσότητες επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων για το σύνολο των σταθμών της ΔΕΗ στο διασυνδεδεμένο σύστημα και στα νησιά Κρήτη και Ρόδο. Επίσης, σημαντική ποσότητα των επεξεργασμένων αποβλήτων, περίπου 28.000.000 m³, χρησιμοποιείται σε κατάντη (downstream) χρήσεις, κυρίως άρδευση κατά τους θερινούς μήνες. Η ποιότητα των κατεργασμένων υγρών αποβλήτων παρακολουθείται συνεχώς και οι αρμόδιοι φορείς, όπως αναφέρθηκε και για τις εκπομπές ατμοσφαιρικών ρύπων, ενημερώνονται συστηματικά για την ποιότητά τους, σύμφωνα με τα προβλεπόμενα στις ΚΥΑ ΕΠΟ των ΑΗΣ (ετήσιες και τετραμηνιαίες εκθέσεις υπερβάσεων), ενώ άμεση (εντός 24ώρου) είναι η ενημέρωση σε περιπτώσεις υπερβάσεων των οριακών τιμών, βλαβών του αντιρρυπαντικού εξοπλισμού κ.λπ. [112]

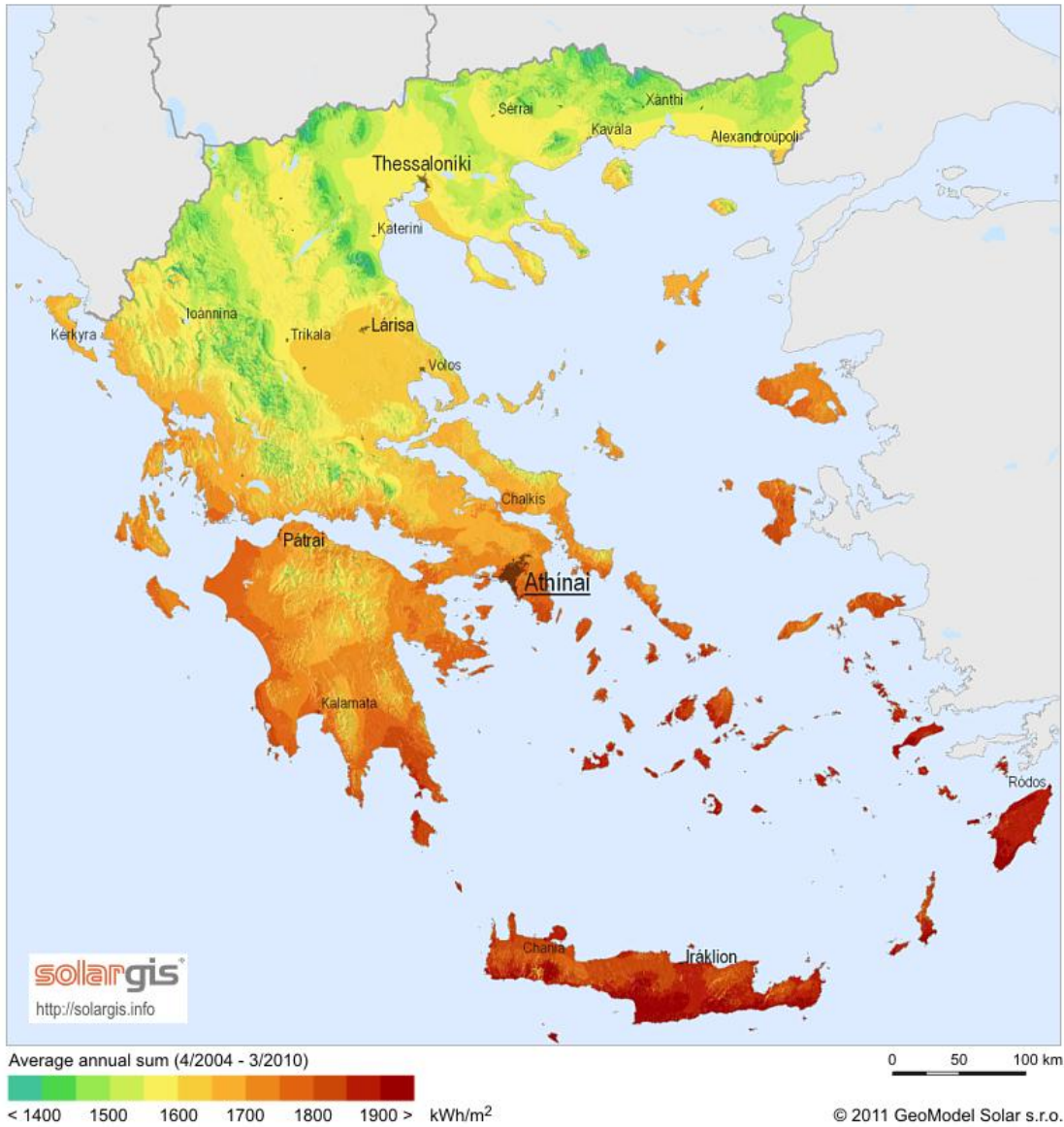


Σχήμα Π.1

Χάρτης GHI (Global Horizontal Irradiation) για την Ελλάδα

Global horizontal irradiation

Greece



Εικόνα Π.1

**Χάρτης Βιομηχανικής Δραστηριότητας στην Ελλάδα - Μονάδες Επεξεργασίας
Αστικών Αποβλήτων (2007-2010)**

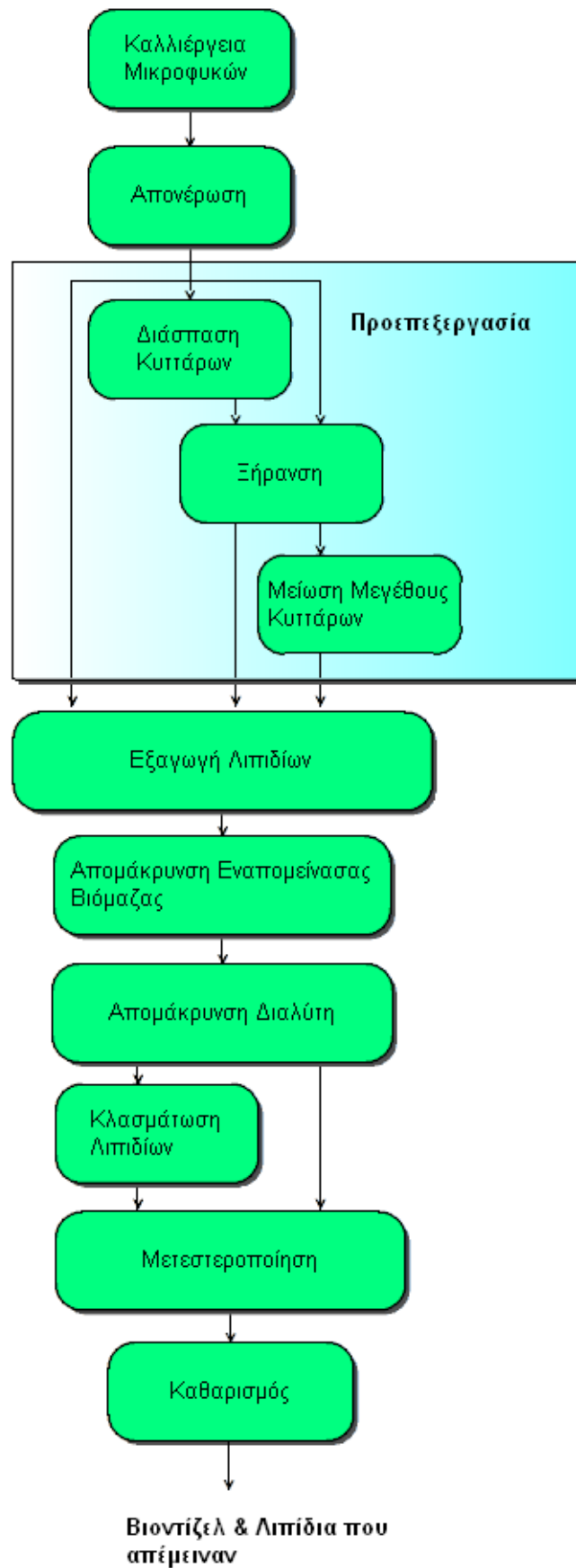


Εικόνα Π.2

Δεδομένα Διαθεσιμότητας Νερού στην Ελλάδα

	1998-2002		2003-2007	
	Έτος	Τιμή	Έτος	Τιμή
Συνολικά Δημοτικά Λύματα ($10^9 \text{ m}^3/\text{yr}$)			2007	0.568
Επεξεργασμένα Δημοτικά Λύματα ($10^9 \text{ m}^3/\text{yr}$)			2007	0.566
Μη Επεξεργασμένα Δημοτικά Λύματα ($10^9 \text{ m}^3/\text{yr}$)			2007	0.0020
Επεξεργασμένα Δημοτικά Λύματα Απορροής ($10^9 \text{ m}^3/\text{yr}$)			2003	0.69
Άμεση Χρήση Επεξεργασμένων Δημοτικών Λυμάτων ($10^9 \text{ m}^3/\text{yr}$)			2003	0.027
Άμεση Χρήση Επεξεργασμένων Δημοτικών Λυμάτων για Λόγους Άρδευσης ($10^9 \text{ m}^3/\text{yr}$)			2003	0.0060
Έκταση με Εξοπλισμό για Πλήρως Ελεγχόμενη Άρδευση: Σύνολο (1000 ha)	2000	1321.0	2007	1555.0
Έκταση με Εξοπλισμό για Πλήρως Ελεγχόμενη Άρδευση: Πραγματικά Αρδύσιμη (1000 ha)	2000	1161.0	2007	1280.0
Ποσοστό της Έκτασης με Εξοπλισμό για Πλήρως Ελεγχόμενη Άρδευση η οποία Πραγματικά Αρδεύεται (%)	2000	87.89	2007	82.32
Έκταση με Εξοπλισμό για Άρδευση: Συνολική (1000 ha)	2000	1321.0	2007	1555.0
Έκταση με Εξοπλισμό για Άρδευση: Πραγματικά Αρδύσιμη (1000 ha)	2000	1161.0	2007	1280.0
Ποσοστό της Έκτασης με Εξοπλισμό για Άρδευση η οποία Πραγματικά Αρδεύεται (%)	2000	87.89	2007	82.32
Ποσοστό της Έκτασης με Εξοπλισμό για Άρδευση (%)	2000	34.35K	2007	47.92K
Συνολική Έκταση με Ύδρευση για Αγροτικές Δραστηριότητες (1000 ha)	2000	1321.0	2007	1555.0
Ποσοστό της Έκτασης με Ύδρευση για Αγροτικές Δραστηριότητες η οποία έχει Εξοπλισμό για Άρδευση (%)	2000	100.0	2007	100.0

Πίνακας Π.8 [113]



Σχήμα Π.2 [87]

Δεδομένα & Παραδοχές Τεχνικοοικονομικής Μελέτης

Ανοικτή Λίμνη				
Πρώτες Ύλες / Αρχικές Ροές				
Ιδιότητα	Μονάδες	base	projected	Πηγή
Δέσμευση CO ₂ Απόδοση	kg CO ₂ /kg βιόμαζας	1.83	1.83	AquaFUELS
Δέσμευσης CO ₂ Απαιτούμενο	% kg CO ₂ /kg βιόμαζας	20	20	Παραδοχή (AquaFUELS)
Απαιτήσεις Θρεπτικών Συστατικών	kg λιπάσματος/kg βιόμαζας	0.3	0.3	Υπολογισμός AquaFUELS
Χαρακτηριστικά Μικροφυκών				
Ιδιότητα	Μονάδες	base	projected	Πηγή
Παραγωγικότητα Βιόμαζας Μικροφυκών	kg/m ² /έτος	3	6.6	AquaFUELS
Λιπιδιακό Περιεχόμενο	% κ.β. ξηρής βιόμαζας μικροφυκών	30	50	Mata et al. (2010)
Παραγωγή Ελαίου	ελαίου/στρέμμα/έτος	5.87	9.78	Mata et al. (2010)
Χαρακτηριστικά Αντιδραστήρα & Μονάδας				
Ιδιότητα	Μονάδες	base	projected	Πηγή
Βάθος Λίμνης	m	0.2	0.3	Παραδοχή
Εξάτμιση Νερού	L/m ² /ημέρα	10	10	Παραδοχή (AquaFUELS)
Ρυθμός Αραιώσης	1/ημέρες	0.02	0.25	Παραδοχή (AquaFUELS & Christi)
Συγκέντρωση Κυττάρων	kg/m ³	0.14	0.5	Christi (2007) & Davis (2011)
Λόγος V/S (όγκος/επιφάνεια)	m ³ /m ²	0.25	0.25	AquaFUELS
Κόστος Παραγωγής 1 kg βιόμαζας μικροφυκών	€/kg			
Ηλεκτρισμός, Εργασία, Φόροι & άλλα Κόστη (Θρεπτικά & CO ₂ χωρίς κόστος)	€/kg παραγόμενης βιόμαζας μικροφυκών/έτος	0.30	0.75	AquaFUELS

Συνολική Κατανάλωση Ηλεκτρισμού	kWh/kg παραγόμενης βιομάζας μικροφυκών	0.715	0.715	<i>Richardson et al. (2010)</i>
Κόστος Ηλεκτρισμού	€/kWh	0.06388	0.06388	http://www.dei.gr [114]
Κόστος Νερού	€/m ²	0.2	0.18	NREL Richardson et al. (2010) &
Κόστος Θρεπτικών Συστατικών	€/kg βιομάζας	0.484068	0.016692	http://www.bls.gov [115] & http://www.xe.com [116]
Κόστος Εγκατάστασης Απονέρωσης/Ξήρανσης	€/στρέμμα	300	260	Zamalloa et al. (2011)
Κόστος Άντλησης Νερού	€/m ³	1.5	0.42	<i>Παραδοχή (AquaFUELS)</i>
Εργαζόμενοι	εργαζόμενοι/στρέμμα	0.018	0.014	<i>Παραδοχή (AquaFUELS)</i>
Κόστος Εργαζομένων	€/εργαζόμενο	81000	48000	<i>Παραδοχή (Richardson)</i>
Συνολικό Κόστος Εργασίας	€/στρέμμα	1458	672	Υπολογισμός
Κόστος Συντήρησης	€/στρέμμα	429	240	Benemann (1996) [117]
Κόστος Αγοράς Γης	€/στρέμμα	1000	100	<i>Παραδοχή (AquaFUELS)</i>
Κόστος Αντιδραστήρα	€/στρέμμα	14300.00	8000.00	AquaFUELS
Ετήσια Λειτουργία	Ημέρες	300	330	<i>Παραδοχή (AquaFUELS)</i>

Χαρακτηριστικά Βιοντίζελ

Ιδιότητα	Μονάδες	base	projected	Πηγή
Παραγωγή Βιοντίζελ ανά μονάδα εδάφους	kg/m ² /έτος	5.1927	8.6515	Mata et al. (2010)
Ενεργειακό Περιεχόμενο Βιοντίζελ	MJ/kg	37.2	37.8	Khoo et al. (2011)
Έσοδα από Βιοντίζελ	€/kg	0.40	0.50	<i>Παραδοχή</i>

Αναερόβια Χώνευση - Παραγωγή Βιοαερίου & Ηλεκτρισμού

Ιδιότητα	Μονάδες	base	projected	Πηγή
Συνολικό Πάγιο	€/στρέμμα	4815.7	5465.5	Zamalloa et al.

Κόστος Συστήματος				(2011)
Παραγωγή CH ₄ (θεωρητική)	m ³ /τόνο πτητικών στερεών	0.00063	0.00079	Sialve et al. (2009)
Παραγωγή NH ₃ (θεωρητική)	kg/τόνο πτητικών στερεών	0.0475	0.054	Sialve et al. (2009)
Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας	MWh/τόνο πτητικών στερεών	7.3959	8.9	Sialve et al. (2009)
Περιβαλλοντική Αποτίμηση Λειτουργίας Μονάδας				
Ιδιότητα	Μονάδες	base	projected	Πηγή
Εκπομπές CO ₂ από τη λειτουργία της μονάδας	τόνοι CO ₂ /τόνοι βιοντίζελ	15.46	0.35	Lam et al. (2012)

Πίνακας Π.9

Φωτοβιοαντιδραστήρας

Πρώτες Ύλες / Αρχικές Ροές

Ιδιότητα	Μονάδες	base	projected	Πηγή
Δέσμευση CO ₂	kg CO ₂ /kg βιόμαζας	1.83	1.83	AquaFUELS
Απόδοση Δέσμευσης CO ₂	%	69	69	Παραδοχή (AquaFUELS)
Απαιτούμενο CO ₂	kg CO ₂ /kg βιόμαζας	2.65	2.65	Υπολογισμός
Απαιτήσεις Θρεπτικών Συστατικών	kg λιπάσματος/kg βιόμαζας	0.4	0.4	AquaFUELS

Χαρακτηριστικά Μικροφυκών

Ιδιότητα	Μονάδες	base	projected	Πηγή
Παραγωγικότητα α Βιόμαζας Μικροφυκών	kg/m ² /έτος	9	33	Mata et al. (2010)
Λιπιδιακό Περιεχόμενο	% κ.β. ξηρής βιόμαζας μικροφυκών	30	50	Mata et al. (2010)
Παραγωγή Ελαίου	m ³ ελαίου/στρέμμα/έτος	11.74	19.56	Mata et al. (2010)

Χαρακτηριστικά Αντιδραστήρα & Μονάδας

Ιδιότητα	Μονάδες	base	projected	Πηγή
Εξάτμιση Νερού	L/m ² /ημέρα	0.5	0.5	Παραδοχή (AquaFUELS)
Ρυθμός Αραιώσης	1/ημέρες	0.384	0.384	Παραδοχή (Christi)
Συγκέντρωση Κυττάρων	kg/m ³	4	4	Christi (2007) & Davis (2011)
Λόγος V/S (όγκος/επιφάνεια)	m ³ /m ²	0.07	0.07	AquaFUELS
Κόστος Παραγωγής 1 kg βιόμαζας μικροφυκών	€/kg παραγόμενης βιόμαζας μικροφυκών/έτος	9.00	3.80	AquaFUELS
Ηλεκτρισμός, Εργασία, Φόροι & άλλα Κόστη (Θρεπτικά & CO ₂ χωρίς κόστος)				
Συνολική Κατανάλωση Ηλεκτρισμού	kWh/kg παραγόμενης βιόμαζας μικροφυκών	3.81	3.81	Richardson et al. (2010)

Κόστος Ηλεκτρισμού	€/kWh/έτος	0.06388	0.06388	http://ww.dei.gr
Κόστος Νερού	€/m ² /έτος	0.2	0.18	NREL Richardson et al. (2010) & http://www.bls.gov & http://www.xe.com
Κόστος Θρεπτικών Συστατικών	€/kg βιόμαζας/έτος	0.48	0.02	
Κόστος Εγκατάστασης Απονέρωσης/Ξήρανσης	€/στρέμμα	300	260	Zamalloa et al. (2011)
Κόστος Άντλησης Νερού	€/m ³ /έτος	1.5	0.42	Παραδοχή (AquaFUELS)
Εργαζόμενοι	εργαζόμενοι/στρέμμα	0.036	0.036	Παραδοχή (AquaFUELS)
Κόστος Εργαζομένων	€/εργαζόμενο/έτος	81000	48000	Παραδοχή (Richardson)
Συνολικό Κόστος Εργασίας	€/στρέμμα/έτος	2916	1728	Υπολογισμός
Κόστος Συντήρησης	€/στρέμμα	4290	720	Benemann (1996)
Κόστος Αγοράς Γης	€/στρέμμα	3550	1780	Παραδοχή (AquaFUELS)
Κόστος Αντιδραστήρα	€/στρέμμα	143000.00	24000.00	Mata et al. (2010)
Ετήσια Λειτουργία	Ημέρες	300	330	Παραδοχή (AquaFUELS)

Χαρακτηριστικά Βιοντίζελ

Ιδιότητα	Μονάδες	base	projected	Πηγή
Παραγωγή Βιοντίζελ ανά μονάδα εδάφους	kg/m ² /έτος	10.3854	17.303	Mata et al. (2010)
Ενεργειακό Περιεχόμενο Βιοντίζελ	MJ/kg	37.2	37.8	Khoo et al. (2011)
Έσοδα από Βιοντίζελ	€/kg	0.40	0.50	Παραδοχή

Αναερόβια Χώνευση - Παραγωγή Βιοαερίου & Ηλεκτρισμού

Ιδιότητα	Μονάδες	base	projected	Πηγή
Συνολικό Πάγιο Κόστος Συστήματος	€/στρέμμα	5465.5	4815.7	Zamalloa et al. (2011)
Παραγωγή CH ₄	m ³ /τόνο	0.00063	0.00079	Sialve et al.

(θεωρητική)	πτητικών στερεών			(2009)
Παραγωγή NH ₃ (θεωρητική)	kg/τόνο πτητικών στερεών	0.0475	0.054	Sialve et al. (2009)
Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας	MWh/τόνο πτητικών στερεών	7.3959	8.9	Sialve et al. (2009)
Περιβαλλοντική Αποτίμηση Λειτουργίας Μονάδας				
Ιδιότητα	Μονάδες	base	projected	Πηγή
Εκπομπές CO ₂ από τη λειτουργία της μονάδας	τόνοι CO ₂ /τόνοι βιοντίζελ	44.37	1.06	Lam et al. (2012)

Πίνακας Π.10

Αναλυτικά Αποτελέσματα Μελέτης Περιπτώσεων για Κάθε Σενάριο

Σενάριο 1Α

Πολύ Υψηλή Παραγωγή CO ₂	Πτολεμαΐδα (PBR)
-------------------------------------	------------------

Χαρακτηριστικά Περιοχής

Ιδιότητα	Μονάδες	base	projected	Πηγή
Ηλιοφάνεια	kWh/m ² /έτος	1,810	1,810	http://ec.europa.eu
Πληθυσμός	Κάτοικοι	45,450	45,450	Εθνική Απογραφή 2010
Συνολική Έκταση	στρέμματα	217,900	217,900	http://www.geodata.gov.gr
Μη Χρησιμοποιούμενη Έκταση	στρέμματα	33,400	33,400	http://www.geodata.gov.gr
Εκπομπές CO ₂	τόνοι/έτος	9,650,000	9,650,000	http://carma.org

Απαιτήσεις Πρώτων Υλών Μονάδας

Ιδιότητα	Μονάδες	base	projected	Πηγή
Συνολική Ποσότητα Απαιτούμενου CO ₂	τόνοι/έτος	797,243	2,923,226	Υπολογισμός
Συνολική Ποσότητα Δεσμευμένου CO ₂	τόνοι/έτος	550,098	2,017,026	Υπολογισμός
Κλάσμα Παροχής CO ₂ από Μονάδα ΔΕΗ	%	8.26	30.29	Υπολογισμός
Ποσοστό Δέσμευσης CO ₂ από Μονάδα ΔΕΗ	%	5.70	20.90	Υπολογισμός
Θρεπτικά Συστατικά	kg/έτος	120,240	440,880	Υπολογισμός
Συνολική Έκταση	m ²	33,400,000	33,400,000	Βάση Αναφοράς
Συνολική Έκταση	στρέμματα	33,400.00	33,400.00	Υπολογισμός

Παραγωγικότητα Μονάδας

Ιδιότητα	Μονάδες	base	projected	Πηγή
Συνολική Παραγωγή Βιόμαζας Μικροφυκών	τόνοι/έτος	300,600	1,102,200	Υπολογισμός
Συνολική Παραγωγή Λιπιδίων	m ³ /έτος	392,116	653,304	Υπολογισμός
Συνολική Παραγωγή Βιοντίζελ	τόνοι/έτος	346,872	577,920	Υπολογισμός

Λειτουργία Μονάδας

Ιδιότητα	Μονάδες	base	projected	Πηγή
Συνολική Εξάτμιση Νερού	m ³ /ημέρα	16,700	16,700	Υπολογισμός

Συνολική Κατανάλωση Ηλεκτρισμού	MWh/έτος	1,145,286	4,199,382	Υπολογισμός
Σύνολο Εργαζόμενων	εργαζόμενοι	1,202	1,202	Υπολογισμός
Όγκος Αντιδραστήρα	m ³	2,338,000	2,338,000	Υπολογισμός
Ετήσια Λειτουργία	Ημέρες	300	330	Παραδοχή

Ανάλυση Κόστους Μονάδας

Ιδιότητα	Μονάδες		Πηγή	
	base	projected		
Κόστος Ηλεκτρισμού	€/έτος	73,160.87	268,256.52	Υπολογισμός
Κόστος Νερού	€/έτος	6,680,000.00	6,012,000.00	Υπολογισμός
Κόστος Θρεπτικών Συστατικών	€/έτος	144,288.00	22,044.00	Υπολογισμός
Κόστος Συλλογής	€/έτος	811,620.00	1,256,508.00	Υπολογισμός
Συνολικό Λειτουργικό Κόστος Μονάδας	€/έτος	2,705,400.00	4,188,360.00	Υπολογισμός
Συνολικό Λειτουργικό Κόστος Μονάδας	€/έτος	7,784,806.63	12,024,873.65	Υπολογισμός
Κόστος Παραγωγής 1 kg Βιόμαζας Μικροφυκών	€/έτος	9.00	3.80	Υπολογισμός
Κόστος Αγοράς Γης	€	118,570,000.00	59,452,000.00	Υπολογισμός
Κόστος Αντιδραστήρα	€	4,776,200,000.00	801,600,000.00	Υπολογισμός
Πάγιο Κόστος Συστήματος	€	4,786,220,000.00	810,284,000.00	Υπολογισμός
Συνολικό Πάγιο Κόστος Μονάδας	€	9,680,990,000.00	1,671,336,000.00	Υπολογισμός
Συνολικό Πάγιο Κόστος Μονάδας	€	9,562,420,000.00	1,611,884,000.00	Υπολογισμός
Συνολικά Έσοδα από Βιοντίζελ	€	138,748.94	288,960.10	Υπολογισμός

Αναερόβια Χώνευση - Παραγωγή Βιοαερίου & Ηλεκτρισμού

Ιδιότητα	Μονάδες	base	projected	Πηγή
Παραγωγή CH ₄ (θεωρητική)	m ³ /έτος	51.13	391.83	Υπολογισμός
Παραγωγή NH ₃ (θεωρητική)	kg/έτος	3,855.20	26,783.46	Υπολογισμός
Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας	MWh/έτος	600,266	4,396,455	Υπολογισμός
Πλεόνασμα/Έλλειμμα Ηλεκτρικής Ενέργειας	MWh/έτος	-545,020	197,073	Υπολογισμός

Περιβαλλοντική Αποτίμηση Λειτουργίας Μονάδας

Ιδιότητα	Μονάδες	base	projected	Πηγή
Εκπομπές CO ₂ από τη λειτουργία της μονάδας	τόνοι CO ₂ /τόνοι βιοντίζελ	15,390,727	612,595	Υπολογισμός

Ισοζύγιο CO ₂ (Παροχή-Εκπομπές)	τόνοι CO ₂	-14,593,483	2,310,631	Υπολογισμός
Ανάλυση Βιωσιμότητας Μονάδας				
<i>Αποτίμηση Κέρδους/Ζημιάς χωρίς επιδότηση CO₂</i>				
Ιδιότητα	Μονάδες	base	projected	Πηγή
Κέρδος/Ζημιά Λειτουργίας Μονάδας	€/έτος	-7,646,057.69	-11,735,913.55	Υπολογισμός
Κέρδος/Ζημιά Λειτουργίας Μονάδας	€/έτος	-2,566,651.06	-3,899,399.90	Υπολογισμός
<i>Ελάχιστη Απαιτούμενη Επιδότηση Δέσμευσης CO₂ για Ισορροπία Κέρδους/Ζημιάς</i>				
Ιδιότητα	Μονάδες	base	projected	Πηγή
Επιδότηση CO ₂	€/τόνο CO ₂	13.90	5.82	Υπολογισμός
Επιδότηση CO ₂	€/τόνο CO ₂	4.67	1.93	Υπολογισμός
Συνολικά Έσοδα από Δέσμευση CO ₂	€/έτος	7,646,057.69	11,735,913.55	Υπολογισμός
Συνολικά Έσοδα από Δέσμευση CO ₂	€/έτος	2,566,651.06	3,899,399.90	Υπολογισμός
Κέρδος/Ζημιά Λειτουργίας Μονάδας	€/έτος	0.00	0.00	Απαίτηση
Κέρδος/Ζημιά Λειτουργίας Μονάδας	€/έτος	0.00	0.00	Απαίτηση
<i>Ελάχιστη Απαιτούμενη Επιδότηση Δέσμευσης CO₂ για Ταχεία Απόσβεση Αρχικού Κεφαλαίου</i>				
Ιδιότητα	Μονάδες	base	projected	Πηγή
Επιδότηση CO ₂	€/τόνο CO ₂	351.72	16.43	Υπολογισμός
Επιδότηση CO ₂	€/τόνο CO ₂	347.41	15.84	Υπολογισμός
Συνολικά Έσοδα από Δέσμευση CO ₂	€/έτος	193,481,051.06	33,137,759.90	Υπολογισμός
Συνολικά Έσοδα από Δέσμευση CO ₂	€/έτος	191,109,651.06	31,948,719.90	Υπολογισμός
Κέρδος/Ζημιά Λειτουργίας Μονάδας	€/έτος	193,619,800.00	33,426,720.00	Υπολογισμός
Κέρδος/Ζημιά Λειτουργίας Μονάδας	€/έτος	191,248,400.00	32,237,680.00	Υπολογισμός
Χρόνος Απόσβεσης Εξοπλισμού (Σε Περίπτωση Κέρδους)	έτη	50.00	50.00	Απαίτηση
Χρόνος Απόσβεσης Εξοπλισμού (Σε Περίπτωση Κέρδους)	έτη	50.00	50.00	Απαίτηση

Πίνακας Π.11

Σενάριο 1B

Πολύ Υψηλή Παραγωγή CO₂

Πτολεμαΐδα (Ανοικτή Λίμνη)

Χαρακτηριστικά Περιοχής				
Ιδιότητα	Μονάδες	base	projected	Πηγή
Ηλιοφάνεια	kWh/m ² /έτος	1,810	1,810	http://ec.europa.eu
Πληθυσμός	Κάτοικοι	45,450	45,450	Εθνική Απογραφή 2010
Συνολική Έκταση	στρέμματα	217,901	217,901	http://www.geodata.gov.gr
Μη Χρησιμοποιούμενη Έκταση	στρέμματα	33,400	33,400	http://www.geodata.gov.gr
Εκπομπές CO ₂	τόνοι/έτος	9,650,000	9,650,000	http://carma.org
Απαιτήσεις Πρώτων Υλών Μονάδας				
Ιδιότητα	Μονάδες	base	projected	Πηγή
Συνολική Ποσότητα Απαιτούμενου CO ₂	τόνοι/έτος	916,830	2,017,026	Υπολογισμός
Συνολική Ποσότητα Δεσμευμένου CO ₂	τόνοι/έτος	183,366	403,405	Υπολογισμός
Κλάσμα Παροχής CO ₂ από Μονάδα ΔΕΗ	%	9.50	20.90	Υπολογισμός
Ποσοστό Δέσμευσης CO ₂ από Μονάδα ΔΕΗ	%	1.90	4.18	Υπολογισμός
Θρεπτικά Συστατικά	kg/έτος	30,060	66,132	Υπολογισμός
Συνολική Έκταση	m ²	33,400,000	33,400,000	Βάση Αναφοράς
Συνολική Έκταση	στρέμματα	33,400.00	33,400.00	Υπολογισμός
Παραγωγικότητα Μονάδας				
Ιδιότητα	Μονάδες	base	projected	Πηγή
Συνολική Παραγωγή Βιομάζας Μικροφυκών	τόνοι/έτος	100,200	220,440	Υπολογισμός
Συνολική Παραγωγή Λιπιδίων	m ³ /έτος	196,058	326,652	Υπολογισμός
Συνολική Παραγωγή Βιοντίζελ	τόνοι/έτος	173,436	288,960	Υπολογισμός
Λειτουργία Μονάδας				
Ιδιότητα	Μονάδες	base	projected	Πηγή
Συνολική Εξάτμιση Νερού	m ³ /ημέρα	334,000	334,000	Υπολογισμός
Συνολική Κατανάλωση Ηλεκτρισμού	MWh/έτος	71,643	157,615	Υπολογισμός
Σύνολο Εργαζόμενων	εργαζόμενοι	601	468	Υπολογισμός
Όγκος Αντιδραστήρα	m ³	8,350,000	8,350,000	Υπολογισμός

Ετήσια Λειτουργία	Ημέρες	300	330	Παραδοχή (AquaFUELS)
Ανάλυση Κόστους Μονάδας				
Ιδιότητα	Μονάδες	base	projected	Πηγή
Κόστος Ηλεκτρισμού	€/έτος	4,576,554.84	10,068,420.65	Υπολογισμός
Κόστος Νερού	€/έτος	6,680,000.00	6,012,000.00	Υπολογισμός
Κόστος Θρεπτικών Συστατικών	€/έτος	48,503.61	3,679.58	Υπολογισμός
Κόστος Συλλογής	€/έτος	22,545.00	19,839.60	Υπολογισμός
Συνολικό Λειτουργικό Κόστος Μονάδας	€/έτος	75,150.00	66,132.00	Υπολογισμός
Συνολικό Λειτουργικό Κόστος Μονάδας	€/έτος	16,140,505.04	26,593,125.33	Υπολογισμός
Κόστος Παραγωγής 1 kg Βιόμαζας Μικροφυκών	€/έτος	0.75	0.30	Υπολογισμός
Κόστος Αγοράς Γης	€	33,400,000.00	3,340,000.00	Υπολογισμός
Κόστος Αντιδραστήρα	€	477,620,000.00	267,200,000.00	Υπολογισμός
Πάγιο Κόστος Συστήματος	€	487,640,000.00	275,884,000.00	Υπολογισμός
Συνολικό Πάγιο Κόστος Μονάδας	€	998,660,000.00	546,424,000.00	Υπολογισμός
Συνολικό Πάγιο Κόστος Μονάδας	€	965,260,000.00	543,084,000.00	Υπολογισμός
Συνολικά Έσοδα από Βιοντίζελ	€	69,374.47	144,480.05	Υπολογισμός
Αναερόβια Χώνευση - Παραγωγή Βιοαερίου & Ηλεκτρισμού				
Ιδιότητα	Μονάδες	base	projected	Πηγή
Παραγωγή CH ₄ (θεωρητική)	m ³ /έτος	17.04	78.37	Υπολογισμός
Παραγωγή NH ₃ (θεωρητική)	kg/έτος	1,285.07	5,356.69	Υπολογισμός
Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας	MWh/έτος	200,089	879,291	Υπολογισμός
Πλεόνασμα/Έλλειμμα Ηλεκτρικής Ενέργειας	MWh/έτος	128,446	721,676	Υπολογισμός
Περιβαλλοντική Αποτίμηση Λειτουργίας Μονάδας				
Ιδιότητα	Μονάδες	base	projected	Πηγή
Εκπομπές CO ₂ από τη λειτουργία της μονάδας	τόνοι CO ₂ /τόνοι βιοντίζελ	2,681,323	101,136	Υπολογισμός
Ισοζύγιο CO ₂ (Παροχή- Εκπομπές)	τόνοι CO ₂	-1,764,493	1,915,890	Υπολογισμός
Ανάλυση Βιωσιμότητας Μονάδας				
<i>Αποτίμηση Κέρδους/Ζημιάς χωρίς επιδότηση CO₂</i>				
Ιδιότητα	Μονάδες	base	projected	Πηγή

Κέρδος/Ζημιά Λειτουργίας Μονάδας	€/έτος	- 16,071,130. 57	- 26,448,645. 28	Υπολογισμός
Κέρδος/Ζημιά Λειτουργίας Μονάδας	€/έτος	-5,775.53	78,348.05	Υπολογισμός
<i>Ελάχιστη Απαιτούμενη Επιδότηση Δέσμευσης CO₂ για Ισορροπία Κέρδους/Ζημιάς</i>				
Ιδιότητα	Μονάδες	base	projected	Πηγή
Επιδότηση CO ₂	€/τόνο CO ₂	87.65	65.56	Υπολογισμός
Επιδότηση CO ₂	€/τόνο CO ₂	0.03	0.00	Υπολογισμός
Συνολικά Έσοδα από Δέσμευση CO ₂	€/έτος	16,071,130.57	26,448,645.28	Υπολογισμός
Συνολικά Έσοδα από Δέσμευση CO ₂	€/έτος	5,775.53	0.00	Υπολογισμός
Κέρδος/Ζημιά Λειτουργίας Μονάδας	€/έτος	0.00	0.00	Απαίτηση
Κέρδος/Ζημιά Λειτουργίας Μονάδας	€/έτος	0.00	0.00	Απαίτηση
<i>Ελάχιστη Απαιτούμενη Επιδότηση Δέσμευσης CO₂ για Ταχεία Απόσβεση Αρχικού Κεφαλαίου</i>				
Ιδιότητα	Μονάδες	base	projected	Πηγή
Επιδότηση CO ₂	€/τόνο CO ₂	108.55	26.73	Υπολογισμός
Επιδότηση CO ₂	€/τόνο CO ₂	104.90	26.57	Υπολογισμός
Συνολικά Έσοδα από Δέσμευση CO ₂	€/έτος	19,903,825.53	10,783,999.95	Υπολογισμός
Συνολικά Έσοδα από Δέσμευση CO ₂	€/έτος	19,235,825.53	10,717,199.95	Υπολογισμός
Κέρδος/Ζημιά Λειτουργίας Μονάδας	€/έτος	19,973,200.00	10,928,480.00	Υπολογισμός
Κέρδος/Ζημιά Λειτουργίας Μονάδας	€/έτος	19,305,200.00	10,861,680.00	Υπολογισμός
Χρόνος Απόσβεσης Εξοπλισμού (Σε Περίπτωση Κέρδους)	έτη	50.00	50.00	Απαίτηση
Χρόνος Απόσβεσης Εξοπλισμού (Σε Περίπτωση Κέρδους)	έτη	50.00	50.00	Απαίτηση

Πίνακας Π.12

Σενάριο 2Α

Υψηλή Παραγωγή CO₂

Μεγαλόπολη (PBR)

Χαρακτηριστικά Περιοχής

Ιδιότητα	Μονάδες	base	projected	Πηγή
Ηλιοφάνεια	kWh/m ² /έτος	1,960	1,960	http://ec.europa.eu
Πληθυσμός	Κάτοικοι	11,030	11,030	Εθνική Απογραφή 2010
Συνολική Έκταση	στρέμματα	331,000	331,000	http://www.geodata.gov.gr
Μη Χρησιμοποιούμενη Έκταση	στρέμματα	22,700	22,700	http://www.geodata.gov.gr
Εκπομπές CO ₂	τόνοι/έτος	4,460,000	4,460,000	http://carma.org

Απαιτήσεις Πρώτων Υλών Μονάδας

Ιδιότητα	Μονάδες	base	projected	Πηγή
Συνολική Ποσότητα Απαιτούμενου CO ₂	τόνοι/έτος	541,839	1,986,743	Υπολογισμός
Συνολική Ποσότητα Δεσμευμένου CO ₂	τόνοι/έτος	373,869	1,370,853	Υπολογισμός
Κλάσμα Παροχής CO ₂ από Μονάδα ΔΕΗ	%	12.15	44.55	Υπολογισμός
Ποσοστό Δέσμευσης CO ₂ από Μονάδα ΔΕΗ	%	8.38	30.74	Υπολογισμός
Θρεπτικά Συστατικά	kg/έτος	81,720	299,640	Υπολογισμός
Συνολική Έκταση	m ²	22,700,000	22,700,000	Βάση Αναφοράς
Συνολική Έκταση	στρέμματα	22,700.00	22,700.00	Υπολογισμός

Παραγωγικότητα Μονάδας

Ιδιότητα	Μονάδες	base	projected	Πηγή
Συνολική Παραγωγή Βιόμαζας Μικροφυκών	τόνοι/έτος	204,300	749,100	Υπολογισμός
Συνολική Παραγωγή Λιπιδίων	m ³ /έτος	266,498	444,012	Υπολογισμός
Συνολική Παραγωγή Βιοντίζελ	τόνοι/έτος	235,749	392,778	Υπολογισμός

Λειτουργία Μονάδας

Ιδιότητα	Μονάδες	base	projected	Πηγή
Συνολική Εξάτμιση Νερού	m ³ /ημέρα	11,350	11,350	Υπολογισμός
Συνολική Κατανάλωση Ηλεκτρισμού	MWh/έτος	778,383	2,854,071	Υπολογισμός

Σύνολο Εργαζομένων	εργαζόμενοι	817	817	Υπολογισμός
Όγκος Αντιδραστήρα	m ³	1,589,000	1,589,000	Υπολογισμός
Ετήσια Λειτουργία	Ημέρες	300	330	Παραδοχή

Ανάλυση Κόστους Μονάδας

Ιδιότητα	Μονάδες	base	projected	Πηγή
Κόστος Ηλεκτρισμού	€/έτος	49,723.11	182,318.06	Υπολογισμός
Κόστος Νερού	€/έτος	4,540,000.00	4,086,000.00	Υπολογισμός
Κόστος Θρεπτικών Συστατικών	€/έτος	98,064.00	14,982.00	Υπολογισμός
Κόστος Συλλογής	€/έτος	551,610.00	853,974.00	Υπολογισμός
Συνολικό Λειτουργικό Κόστος Μονάδας	€/έτος	1,838,700.00	2,846,580.00	Υπολογισμός
Συνολικό Λειτουργικό Κόστος Μονάδας	€/έτος	5,290,871.57	8,172,593.77	Υπολογισμός
Κόστος Παραγωγής 1 kg Βιόμαζας Μικροφυκών	€/έτος	9.00	3.80	Υπολογισμός
Κόστος Αγοράς Γης	€	80,585,000.00	40,406,000.00	Υπολογισμός
Κόστος Αντιδραστήρα	€	3,246,100,000.00	544,800,000.00	Υπολογισμός
Πάγιο Κόστος Συστήματος	€	3,252,910,000.00	550,702,000.00	Υπολογισμός
Συνολικό Πάγιο Κόστος Μονάδας	€	6,579,595,000.00	1,135,908,000.00	Υπολογισμός
Συνολικό Πάγιο Κόστος Μονάδας	€	6,499,010,000.00	1,095,502,000.00	Υπολογισμός
Συνολικά Έσοδα από Βιοντίζελ	€	94,299.43	196,389.05	Υπολογισμός

Αναερόβια Χώνευση - Παραγωγή Βιοαερίου & Ηλεκτρισμού

Ιδιότητα	Μονάδες	base	projected	Πηγή
Παραγωγή CH ₄ (θεωρητική)	m ³ /έτος	34.75	266.31	Υπολογισμός
Παραγωγή NH ₃ (θεωρητική)	kg/έτος	2,620.15	18,203.13	Υπολογισμός
Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας	MWh/έτος	407,965	2,988,010	Υπολογισμός
Πλεόνασμα/Έλλειμμα Ηλεκτρικής Ενέργειας	MWh/έτος	-370,418	133,939	Υπολογισμός

Περιβαλλοντική Αποτίμηση Λειτουργίας Μονάδας

Ιδιότητα	Μονάδες	base	projected	Πηγή
Εκπομπές CO ₂ από τη λειτουργία της μονάδας	τόνοι CO ₂ /τόνοι βιοντίζελ	10,460,164	416,345	Υπολογισμός
Ισοζύγιο CO ₂ (Παροχή-Εκπομπές)	τόνοι CO ₂	-9,918,325	1,570,399	Υπολογισμός

Ανάλυση Βιωσιμότητας Μονάδας				
<i>Αποτίμηση Κέρδους/Ζημιάς χωρίς επιδότηση CO₂</i>				
Ιδιότητα	Μονάδες	base	projected	Πηγή
<i>Κέρδος/Ζημιά Λειτουργίας Μονάδας</i>	€/έτος	-5,196,572.14	-7,976,204.72	Υπολογισμός
<i>Κέρδος/Ζημιά Λειτουργίας Μονάδας</i>	€/έτος	-1,744,400.57	-2,650,190.95	Υπολογισμός
<i>Ελάχιστη Απαιτούμενη Επιδότηση Δέσμευσης CO₂ για Ισορροπία Κέρδους/Ζημιάς</i>				
Ιδιότητα	Μονάδες	base	projected	Πηγή
Επιδότηση CO ₂	€/τόνο CO ₂	13.90	5.82	Υπολογισμός
Επιδότηση CO ₂	€/τόνο CO ₂	4.67	1.93	Υπολογισμός
Συνολικά Έσοδα από Πώληση Βιοντίζελ και Δέσμευση CO ₂	€/έτος	5,196,572.14	7,976,204.72	Υπολογισμός
Συνολικά Έσοδα από Πώληση Βιοντίζελ και Δέσμευση CO ₂	€/έτος	1,744,400.57	2,650,190.95	Υπολογισμός
<i>Κέρδος/Ζημιά Λειτουργίας Μονάδας</i>	€/έτος	0.00	0.00	Απαίτηση
<i>Κέρδος/Ζημιά Λειτουργίας Μονάδας</i>	€/έτος	0.00	0.00	Απαίτηση
<i>Ελάχιστη Απαιτούμενη Επιδότηση Δέσμευσης CO₂ για Ταχεία Απόσβεση Αρχικού Κεφαλαίου</i>				
Ιδιότητα	Μονάδες	base	projected	Πηγή
Επιδότηση CO ₂	€/τόνο CO ₂	351.72	16.43	Υπολογισμός
Επιδότηση CO ₂	€/τόνο CO ₂	347.41	15.84	Υπολογισμός
Συνολικά Έσοδα από Δέσμευση CO ₂	€/έτος	131,497,600.57	22,521,770.95	Υπολογισμός
Συνολικά Έσοδα από Δέσμευση CO ₂	€/έτος	129,885,900.57	21,713,650.95	Υπολογισμός
<i>Κέρδος/Ζημιά Λειτουργίας Μονάδας</i>	€/έτος	131,591,900.00	22,718,160.00	Υπολογισμός
<i>Κέρδος/Ζημιά Λειτουργίας Μονάδας</i>	€/έτος	129,980,200.00	21,910,040.00	Υπολογισμός
<i>Χρόνος Απόσβεσης Εξοπλισμού (Σε Περίπτωση Κέρδους)</i>	έτη	50.00	50.00	Απαίτηση
<i>Χρόνος Απόσβεσης Εξοπλισμού (Σε Περίπτωση Κέρδους)</i>	έτη	50.00	50.00	Απαίτηση

Πίνακας Π.13

Σενάριο 2B

Υψηλή Παραγωγή CO₂

Μεγαλόπολη (Ανοικτή Λίμνη)

Χαρακτηριστικά Περιοχής				
Ιδιότητα	Μονάδες	base	projected	Πηγή
Ηλιοφάνεια	kWh/m ² /έτος	1,960	1,960	http://ec.europa.eu
Πληθυσμός	Κάτοικοι	11,030	11,030	Εθνική Απογραφή 2010
Συνολική Έκταση	στρέμματα	331,000	331,000	http://www.geodata.gov.gr
Μη Χρησιμοποιούμενη Έκταση	στρέμματα	22,700	22,700	http://www.geodata.gov.gr
Εκπομπές CO ₂	τόνοι/έτος	4,460,000	4,460,000	http://carma.org
Απαιτήσεις Πρώτων Υλών Μονάδας				
Ιδιότητα	Μονάδες	base	projected	Πηγή
Συνολική Ποσότητα Απαιτούμενου CO ₂	τόνοι/έτος	623,115	1,370,853	Υπολογισμός
Συνολική Ποσότητα Δεσμευμένου CO ₂	τόνοι/έτος	124,623	274,171	Υπολογισμός
Κλάσμα Παροχής CO ₂ από Μονάδα ΔΕΗ	%	13.97	30.74	Υπολογισμός
Ποσοστό Δέσμευσης CO ₂ από Μονάδα ΔΕΗ	%	2.79	6.15	Υπολογισμός
Θρεπτικά Συστατικά	kg/έτος	20,430	44,946	Υπολογισμός
Συνολική Έκταση	m ²	22,700,000	22,700,000	Βάση Αναφοράς
Συνολική Έκταση	στρέμματα	22,700.00	22,700.00	Υπολογισμός
Παραγωγικότητα Μονάδας				
Ιδιότητα	Μονάδες	base	projected	Πηγή
Συνολική Παραγωγή Βιόμαζας Μικροφυκών	τόνοι/έτος	68,100	149,820	Υπολογισμός
Συνολική Παραγωγή Λιπιδίων	m ³ /έτος	133,249	222,006	Υπολογισμός
Συνολική Παραγωγή Βιοντίζελ	τόνοι/έτος	117,874	196,389	Υπολογισμός
Λειτουργία Μονάδας				
Ιδιότητα	Μονάδες	base	projected	Πηγή
Συνολική Εξάτμιση Νερού	m ³ /ημέρα	227,000	227,000	Υπολογισμός
Συνολική Κατανάλωση Ηλεκτρισμού	MWh/έτος	48,692	107,121	Υπολογισμός
Σύνολο Εργαζομένων	εργαζόμενοι	409	318	Υπολογισμός

Όγκος Αντιδραστήρα	m ³	5,675,000	5,675,000	Υπολογισμός
Ετήσια Λειτουργία	Ημέρες	300	330	Παραδοχή (AquaFUELS)

Ανάλυση Κόστους Μονάδας

Ιδιότητα	Μονάδες	base	projected	Πηγή
Κόστος Ηλεκτρισμού	€/έτος	3,110,413.02	6,842,908.64	Υπολογισμός
Κόστος Νερού	€/έτος	4,540,000.00	4,086,000.00	Υπολογισμός
Κόστος Θρεπτικών Συστατικών	€/έτος	32,965.03	2,500.80	Υπολογισμός
Κόστος Συλλογής	€/έτος	15,322.50	13,483.80	Υπολογισμός
Συνολικό Λειτουργικό Κόστος Μονάδας	€/έτος	51,075.00	44,946.00	Υπολογισμός
Συνολικό Λειτουργικό Κόστος Μονάδας	€/έτος	10,969,744.45	18,073,770.81	Υπολογισμός
Κόστος Παραγωγής 1 kg Βιόμαζας Μικροφυκών	€/έτος	0.75	0.30	Υπολογισμός
Κόστος Αγοράς Γης	€	22,700,000.00	2,270,000.00	Υπολογισμός
Κόστος Αντιδραστήρα	€	324,610,000.00	181,600,000.00	Υπολογισμός
Πάγιο Κόστος Συστήματος	€	331,420,000.00	187,502,000.00	Υπολογισμός
Συνολικό Πάγιο Κόστος Μονάδας	€	678,730,000.00	371,372,000.00	Υπολογισμός
Συνολικό Πάγιο Κόστος Μονάδας	€	656,030,000.00	369,102,000.00	Υπολογισμός
Συνολικά Έσοδα από Βιοντίζελ	€	47,149.72	98,194.53	Υπολογισμός

Αναερόβια Χώνευση - Παραγωγή Βιοαερίου & Ηλεκτρισμού

Ιδιότητα	Μονάδες	base	projected	Πηγή
Παραγωγή CH ₄ (θεωρητική)	m ³ /έτος	11.58	53.26	Υπολογισμός
Παραγωγή NH ₃ (θεωρητική)	kg/έτος	873.38	3,640.63	Υπολογισμός
Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας	MWh/έτος	135,988	597,602	Υπολογισμός
Πλεόνασμα/Ελλειμμα Ηλεκτρικής Ενέργειας	MWh/έτος	87,297	490,481	Υπολογισμός

Περιβαλλοντική Αποτίμηση Λειτουργίας Μονάδας

Ιδιότητα	Μονάδες	base	projected	Πηγή
Εκπομπές CO ₂ από τη λειτουργία της μονάδας	τόνοι CO ₂ /τόνοι βιοντίζελ	1,822,337	68,736	Υπολογισμός
Ισοζύγιο CO ₂ (Παροχή- Εκπομπές)	τόνοι CO ₂	-1,199,222	1,302,117	Υπολογισμός

Ανάλυση Βιωσιμότητας Μονάδας

<i>Αποτίμηση Κέρδους/Ζημιάς χωρίς επιδότηση CO₂</i>				
Ιδιότητα	Μονάδες	base	projected	Πηγή
Κέρδος/Ζημιά Λειτουργίας Μονάδας	€/έτος	-10,922,594.73	-17,975,576.28	Υπολογισμός
Κέρδος/Ζημιά Λειτουργίας Μονάδας	€/έτος	-3,925.28	53,248.53	Υπολογισμός
<i>Ελάχιστη Απαιτούμενη Επιδότηση Δέσμευσης CO₂ για Ισορροπία Κέρδους/Ζημιάς</i>				
Ιδιότητα	Μονάδες	base	projected	Πηγή
Επιδότηση CO ₂	€/τόνο CO ₂	87.65	65.56	Υπολογισμός
Επιδότηση CO ₂	€/τόνο CO ₂	0.03	0.00	Υπολογισμός
Συνολικά Έσοδα από Πώληση Βιοντίζελ και Δέσμευση CO ₂	€/έτος	10,922,594.73	17,975,576.28	Υπολογισμός
Συνολικά Έσοδα από Πώληση Βιοντίζελ και Δέσμευση CO ₂	€/έτος	3,925.28	-53,248.53	Υπολογισμός
Κέρδος/Ζημιά Λειτουργίας Μονάδας	€/έτος	0.00	0.00	Απαίτηση
Κέρδος/Ζημιά Λειτουργίας Μονάδας	€/έτος	0.00	0.00	Απαίτηση
<i>Ελάχιστη Απαιτούμενη Επιδότηση Δέσμευσης CO₂ για Ταχεία Απόσβεση Αρχικού Κεφαλαίου</i>				
Ιδιότητα	Μονάδες	base	projected	Πηγή
Επιδότηση CO ₂	€/τόνο CO ₂	108.55	26.73	Υπολογισμός
Επιδότηση CO ₂	€/τόνο CO ₂	104.90	26.57	Υπολογισμός
Συνολικά Έσοδα από Δέσμευση CO ₂	€/έτος	13,527,450.28	7,329,245.48	Υπολογισμός
Συνολικά Έσοδα από Δέσμευση CO ₂	€/έτος	13,073,450.28	7,283,845.48	Υπολογισμός
Κέρδος/Ζημιά Λειτουργίας Μονάδας	€/έτος	13,574,600.00	7,427,440.00	Υπολογισμός
Κέρδος/Ζημιά Λειτουργίας Μονάδας	€/έτος	13,120,600.00	7,382,040.00	Υπολογισμός
Χρόνος Απόσβεσης Εξοπλισμού (Σε Περίπτωση Κέρδους)	έτη	50.00	50.00	Απαίτηση
Χρόνος Απόσβεσης Εξοπλισμού (Σε Περίπτωση Κέρδους)	έτη	50.00	50.00	Απαίτηση

Πίνακας Π.14

Σενάριο 3Α

Μέση Παραγωγή CO₂

Κερασίι (PBR)

Χαρακτηριστικά Περιοχής				
Ιδιότητα	Μονάδες	base	projected	Πηγή
Ηλιοφάνεια	kWh/m ² /έτος	2,050	2,050	http://ec.europa.eu
Πληθυσμός	Κάτοικοι	91,089	91,089	Εθνική Απογραφή 2010
Συνολική Έκταση	στρέμματα	8,000	8,000	http://www.geodata.gov.gr
Μη Χρησιμοποιούμενη Έκταση	στρέμματα	2,000	2,000	http://www.geodata.gov.gr
Εκπομπές CO ₂	τόνοι/έτος	488,240	488,240	http://carma.org
Απαιτήσεις Πρώτων Υλών Μονάδας				
Ιδιότητα	Μονάδες	base	projected	Πηγή
Συνολική Ποσότητα Απαιτούμενου CO ₂	τόνοι/έτος	47,739	175,043	Υπολογισμός
Συνολική Ποσότητα Δεσμευμένου CO ₂	τόνοι/έτος	32,940	120,780	Υπολογισμός
Κλάσμα Παροχής CO ₂ από Μονάδα ΔΕΗ	%	9.78	35.85	Υπολογισμός
Ποσοστό Δέσμευσης CO ₂ από Μονάδα ΔΕΗ	%	6.75	24.74	Υπολογισμός
Θρεπτικά Συστατικά	kg/έτος	7,200	26,400	Υπολογισμός
Συνολική Έκταση	m ²	2,000,000	2,000,000	Βάση Αναφοράς
Συνολική Έκταση	στρέμματα	2,000.00	2,000.00	Υπολογισμός
Παραγωγικότητα Μονάδας				
Ιδιότητα	Μονάδες	base	projected	Πηγή
Συνολική Παραγωγή Βιομάζας Μικροφυκών	τόνοι/έτος	18,000	66,000	Υπολογισμός
Συνολική Παραγωγή Λιπιδίων	m ³ /έτος	23,480	39,120	Υπολογισμός
Συνολική Παραγωγή Βιοντίζελ	τόνοι/έτος	20,771	34,606	Υπολογισμός
Λειτουργία Μονάδας				
Ιδιότητα	Μονάδες	base	projected	Πηγή
Συνολική Εξάτμιση Νερού	m ³ /ημέρα	1,000	1,000	Υπολογισμός
Συνολική Κατανάλωση Ηλεκτρισμού	MWh/έτος	68,580	251,460	Υπολογισμός
Σύνολο Εργαζομένων	εργαζόμενοι	72	72	Υπολογισμός

Όγκος Αντιδραστήρα	m ³	140,000	140,000	Υπολογισμός
Ετήσια Λειτουργία	Ημέρες	300	330	Παραδοχή

Ανάλυση Κόστους Μονάδας

Ιδιότητα	Μονάδες	base	projected	Πηγή
Κόστος Ηλεκτρισμού	€/έτος	4,380.89	16,063.26	Υπολογισμός
Κόστος Νερού	€/έτος	400,000.00	360,000.00	Υπολογισμός
Κόστος Θρεπτικών Συστατικών	€/έτος	8,640.00	1,320.00	Υπολογισμός
Κόστος Συλλογής	€/έτος	48,600.00	75,240.00	Υπολογισμός
Συνολικό Λειτουργικό Κόστος Μονάδας	€/έτος	162,000.00	250,800.00	Υπολογισμός
Συνολικό Λειτουργικό Κόστος Μονάδας	€/έτος	466,156.09	720,052.31	Υπολογισμός
Κόστος Παραγωγής 1 kg Βιομάζας Μικροφυκών	€/έτος	9.00	3.80	Υπολογισμός
Κόστος Αγοράς Γης	€	7,100,000.00	3,560,000.00	Υπολογισμός
Κόστος Αντιδραστήρα	€	286,000,000.00	48,000,000.00	Υπολογισμός
Πάγιο Κόστος Συστήματος	€	286,600,000.00	48,520,000.00	Υπολογισμός
Συνολικό Πάγιο Κόστος Μονάδας	€	579,700,000.00	100,080,000.00	Υπολογισμός
Συνολικό Πάγιο Κόστος Μονάδας	€	572,600,000.00	96,520,000.00	Υπολογισμός
Συνολικά Έσοδα από Βιοντίζελ	€	8,308.32	17,303.00	Υπολογισμός

Αναερόβια Χώνευση - Παραγωγή Βιοαερίου & Ηλεκτρισμού

Ιδιότητα	Μονάδες	base	projected	Πηγή
Παραγωγή CH ₄ (θεωρητική)	m ³ /έτος	3.06	23.46	Υπολογισμός
Παραγωγή NH ₃ (θεωρητική)	kg/έτος	230.85	1,603.80	Υπολογισμός
Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας	MWh/έτος	35,944	263,261	Υπολογισμός
Πλεόνασμα/Ελλείμμα Ηλεκτρικής Ενέργειας	MWh/έτος	-32,636	11,801	Υπολογισμός

Περιβαλλοντική Αποτίμηση Λειτουργίας Μονάδας

Ιδιότητα	Μονάδες	base	projected	Πηγή
Εκπομπές CO ₂ από τη λειτουργία της μονάδας	τόνοι CO ₂ /τόνοι βιοντίζελ	921,600	36,682	Υπολογισμός
Ισοζύγιο CO ₂ (Παροχή-Εκπομπές)	τόνοι CO ₂	-873,861	138,361	Υπολογισμός

Ανάλυση Βιωσιμότητας Μονάδας				
<i>Αποτίμηση Κέρδους/Ζημιάς χωρίς επιδότηση CO₂</i>				
Ιδιότητα	Μονάδες	base	projected	Πηγή
<i>Κέρδος/Ζημιά Λειτουργίας Μονάδας</i>	€/έτος	-457,847.77	-702,749.31	Υπολογισμός
<i>Κέρδος/Ζημιά Λειτουργίας Μονάδας</i>	€/έτος	-153,691.68	-233,497.00	Υπολογισμός
<i>Ελάχιστη Απαιτούμενη Επιδότηση Δέσμευσης CO₂ για Ισορροπία Κέρδους/Ζημιάς</i>				
Ιδιότητα	Μονάδες	base	projected	Πηγή
<i>Επιδότηση CO₂</i>	€/τόνο CO ₂	13.90	5.82	Υπολογισμός
<i>Επιδότηση CO₂</i>	€/τόνο CO ₂	4.67	1.93	Υπολογισμός
<i>Συνολικά Έσοδα από Πώληση Βιοντίζελ και Δέσμευση CO₂</i>	€/έτος	457,847.77	702,749.31	Υπολογισμός
<i>Συνολικά Έσοδα από Πώληση Βιοντίζελ και Δέσμευση CO₂</i>	€/έτος	153,691.68	233,497.00	Υπολογισμός
<i>Κέρδος/Ζημιά Λειτουργίας Μονάδας</i>	€/έτος	0.00	0.00	Απαίτηση
<i>Κέρδος/Ζημιά Λειτουργίας Μονάδας</i>	€/έτος	0.00	0.00	Απαίτηση
<i>Ελάχιστη Απαιτούμενη Επιδότηση Δέσμευσης CO₂ για Ταχεία Απόσβεση Αρχικού Κεφαλαίου</i>				
Ιδιότητα	Μονάδες	base	projected	Πηγή
<i>Επιδότηση CO₂</i>	€/τόνο CO ₂	351.72	16.43	Υπολογισμός
<i>Επιδότηση CO₂</i>	€/τόνο CO ₂	347.41	15.84	Υπολογισμός
<i>Συνολικά Έσοδα από Δέσμευση CO₂</i>	€/έτος	11,585,691.68	1,984,297.00	Υπολογισμός
<i>Συνολικά Έσοδα από Δέσμευση CO₂</i>	€/έτος	11,443,691.68	1,913,097.00	Υπολογισμός
<i>Κέρδος/Ζημιά Λειτουργίας Μονάδας</i>	€/έτος	11,594,000.00	2,001,600.00	Υπολογισμός
<i>Κέρδος/Ζημιά Λειτουργίας Μονάδας</i>	€/έτος	11,452,000.00	1,930,400.00	Υπολογισμός
<i>Χρόνος Απόσβεσης Εξοπλισμού (Σε Περίπτωση Κέρδους)</i>	έτη	50.00	50.00	Απαίτηση
<i>Χρόνος Απόσβεσης Εξοπλισμού (Σε Περίπτωση Κέρδους)</i>	έτη	50.00	50.00	Απαίτηση

Πίνακας Π.15

Σενάριο 3B

Μέση Παραγωγή CO₂

Κερατσίνι (Ανοικτή Λίμνη)

Χαρακτηριστικά Περιοχής				
Ιδιότητα	Μονάδες	base	projected	Πηγή
Ηλιοφάνεια	kWh/m ² /έτος	2,050	2,050	http://ec.europa.eu
Πληθυσμός	Κάτοικοι	91,089	91,089	Εθνική Απογραφή 2010
Συνολική Έκταση	στρέμματα	8,000	8,000	http://www.geodata.gov.gr
Μη Χρησιμοποιούμενη Έκταση	στρέμματα	2,000	2,000	http://www.geodata.gov.gr
Εκπομπές CO ₂	τόνοι/έτος	488,240	488,240	http://carma.org
Απαιτήσεις Πρώτων Υλών Μονάδας				
Ιδιότητα	Μονάδες	base	projected	Πηγή
Συνολική Ποσότητα Απαιτούμενου CO ₂	τόνοι/έτος	54,900	120,780	Υπολογισμός
Συνολική Ποσότητα Δεσμευμένου CO ₂	τόνοι/έτος	10,980	24,156	Υπολογισμός
Κλάσμα Παροχής CO ₂ από Μονάδα ΔΕΗ	%	11.24	24.74	Υπολογισμός
Ποσοστό Δέσμευσης CO ₂ από Μονάδα ΔΕΗ	%	2.25	4.95	Υπολογισμός
Θρεπτικά Συστατικά	kg/έτος	1,800	3,960	Υπολογισμός
Συνολική Έκταση	m ²	2,000,000	2,000,000	Βάση Αναφοράς
Συνολική Έκταση	στρέμματα	2,000.00	2,000.00	Υπολογισμός
Παραγωγικότητα Μονάδας				
Ιδιότητα	Μονάδες	base	projected	Πηγή
Συνολική Παραγωγή Βιόμαζας Μικροφυκών	τόνοι/έτος	6,000	13,200	Υπολογισμός
Συνολική Παραγωγή Λιπιδίων	m ³ /έτος	11,740	19,560	Υπολογισμός
Συνολική Παραγωγή Βιοντίζελ	τόνοι/έτος	10,385	17,303	Υπολογισμός
Λειτουργία Μονάδας				
Ιδιότητα	Μονάδες	base	projected	Πηγή
Συνολική Εξάτμιση Νερού	m ³ /ημέρα	20,000	20,000	Υπολογισμός
Συνολική Κατανάλωση Ηλεκτρισμού	MWh/έτος	4,290	9,438	Υπολογισμός
Σύνολο Εργαζομένων	εργαζόμενοι	36	28	Υπολογισμός

Όγκος Αντιδραστήρα	m ³	500,000	500,000	Υπολογισμός
Ετήσια Λειτουργία	Ημέρες	300	330	Παραδοχή (AquaFUELS)

Ανάλυση Κόστους Μονάδας

Ιδιότητα	Μονάδες	base	projected	Πηγή
Κόστος Ηλεκτρισμού	€/έτος	274,045.20	602,899.44	Υπολογισμός
Κόστος Νερού	€/έτος	400,000.00	360,000.00	Υπολογισμός
Κόστος Θρεπτικών Συστατικών	€/έτος	2,904.41	220.33	Υπολογισμός
Κόστος Συλλογής	€/έτος	1,350.00	1,188.00	Υπολογισμός
Συνολικό Λειτουργικό Κόστος Μονάδας	€/έτος	4,500.00	3,960.00	Υπολογισμός
Συνολικό Λειτουργικό Κόστος Μονάδας	€/έτος	966,497.31	1,592,402.71	Υπολογισμός
Κόστος Παραγωγής 1 kg Βιόμαζας Μικροφυκών	€/έτος	0.75	0.30	Υπολογισμός
Κόστος Αγοράς Γης	€	2,000,000.00	200,000.00	Υπολογισμός
Κόστος Αντιδραστήρα	€	28,600,000.00	16,000,000.00	Υπολογισμός
Πάγιο Κόστος Συστήματος	€	29,200,000.00	16,520,000.00	Υπολογισμός
Συνολικό Πάγιο Κόστος Μονάδας	€	59,800,000.00	32,720,000.00	Υπολογισμός
Συνολικό Πάγιο Κόστος Μονάδας	€	57,800,000.00	32,520,000.00	Υπολογισμός
Συνολικά Έσοδα από Βιοντίζελ	€	4,154.16	8,651.50	Υπολογισμός

Αναερόβια Χώνευση - Παραγωγή Βιοαερίου & Ηλεκτρισμού

Ιδιότητα	Μονάδες	base	projected	Πηγή
Παραγωγή CH ₄ (θεωρητική)	m ³ /έτος	1.02	4.69	Υπολογισμός
Παραγωγή NH ₃ (θεωρητική)	kg/έτος	76.95	320.76	Υπολογισμός
Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας	MWh/έτος	11,981	52,652	Υπολογισμός
Πλεόνασμα/Έλλειμμα Ηλεκτρικής Ενέργειας	MWh/έτος	7,691	43,214	Υπολογισμός

Περιβαλλοντική Αποτίμηση Λειτουργίας Μονάδας

Ιδιότητα	Μονάδες	base	projected	Πηγή
Εκπομπές CO ₂ από τη λειτουργία της μονάδας	τόνοι CO ₂ /τόνοι βιοντίζελ	160,558	6,056	Υπολογισμός
Ισοζύγιο CO ₂ (Παροχή- Εκπομπές)	τόνοι CO ₂	-105,658	114,724	Υπολογισμός

Ανάλυση Βιωσιμότητας Μονάδας				
<i>Αποτίμηση Κέρδους/Ζημιάς χωρίς επιδότηση CO₂</i>				
Ιδιότητα	Μονάδες	base	projected	Πηγή
Κέρδος/Ζημιά Λειτουργίας Μονάδας	€/έτος	-962,343.15	-1,583,751.21	Υπολογισμός
Κέρδος/Ζημιά Λειτουργίας Μονάδας	€/έτος	-345.84	4,691.50	Υπολογισμός
<i>Ελάχιστη Απαιτούμενη Επιδότηση Δέσμευσης CO₂ για Ισορροπία Κέρδους/Ζημιάς</i>				
Ιδιότητα	Μονάδες	base	projected	Πηγή
Επιδότηση CO ₂	€/τόνο CO ₂	87.65	65.56	Υπολογισμός
Επιδότηση CO ₂	€/τόνο CO ₂	0.03	0.00	Υπολογισμός
Συνολικά Έσοδα από Πώληση Βιοντίζελ και Δέσμευση CO ₂	€/έτος	962,343.15	1,583,751.21	Υπολογισμός
Συνολικά Έσοδα από Πώληση Βιοντίζελ και Δέσμευση CO ₂	€/έτος	345.84	-4,691.50	Υπολογισμός
Κέρδος/Ζημιά Λειτουργίας Μονάδας	€/έτος	0.00	0.00	Απαίτηση
Κέρδος/Ζημιά Λειτουργίας Μονάδας	€/έτος	0.00	0.00	Απαίτηση
<i>Ελάχιστη Απαιτούμενη Επιδότηση Δέσμευσης CO₂ για Ταχεία Απόσβεση Αρχικού Κεφαλαίου</i>				
Ιδιότητα	Μονάδες	base	projected	Πηγή
Επιδότηση CO ₂	€/τόνο CO ₂	108.55	26.73	Υπολογισμός
Επιδότηση CO ₂	€/τόνο CO ₂	104.90	26.57	Υπολογισμός
Συνολικά Έσοδα από Δέσμευση CO ₂	€/έτος	1,191,845.84	645,748.50	Υπολογισμός
Συνολικά Έσοδα από Δέσμευση CO ₂	€/έτος	1,151,845.84	641,748.50	Υπολογισμός
Κέρδος/Ζημιά Λειτουργίας Μονάδας	€/έτος	1,196,000.00	654,400.00	Υπολογισμός
Κέρδος/Ζημιά Λειτουργίας Μονάδας	€/έτος	1,156,000.00	650,400.00	Υπολογισμός
Χρόνος Απόσβεσης Εξοπλισμού (Σε Περίπτωση Κέρδους)	έτη	50.00	50.00	Απαίτηση
Χρόνος Απόσβεσης Εξοπλισμού (Σε Περίπτωση Κέρδους)	έτη	50.00	50.00	Απαίτηση

Πίνακας Π.16

Σενάριο 4Α

Χαμηλή Παραγωγή CO₂

Σάμος (PBR)

Χαρακτηριστικά Περιοχής				
Ιδιότητα	Μονάδες	base	projected	Πηγή
Ηλιοφάνεια	kWh/m ² /έτος	2,110	2,110	http://ec.europa.eu
Πληθυσμός	Κάτοικοι	32,759	32,759	Εθνική Απογραφή 2010
Συνολική Έκταση	στρέμματα	780,600	780,600	http://www.geodata.gov.gr
Μη Χρησιμοποιούμενη Έκταση	στρέμματα	36,800	36,800	http://www.geodata.gov.gr
Εκπομπές CO ₂	τόνοι/έτος	105,260	105,260	http://carma.org
Απαιτήσεις Πρώτων Υλών Μονάδας				
Ιδιότητα	Μονάδες	base	projected	Πηγή
Συνολική Ποσότητα Απαιτούμενου CO ₂	τόνοι/έτος	105,260	105,260	Υπολογισμός
Συνολική Ποσότητα Δεσμευμένου CO ₂	τόνοι/έτος	72,629	72,629	Υπολογισμός
Κλάσμα Παροχής CO ₂ από Μονάδα ΔΕΗ	%	100.00	100.00	Βάση Αναφοράς
Ποσοστό Δέσμευσης CO ₂ από Μονάδα ΔΕΗ	%	69.00	69.00	Υπολογισμός
Θρεπτικά Συστατικά	kg/έτος	15,875	15,875	Υπολογισμός
Συνολική Έκταση	m ²	4,409,800	1,202,673	Υπολογισμός
Συνολική Έκταση	στρέμματα	4,409.80	1,202.67	Υπολογισμός
Παραγωγικότητα Μονάδας				
Ιδιότητα	Μονάδες	base	projected	Πηγή
Συνολική Παραγωγή Βιόμαζας Μικροφυκών	τόνοι/έτος	39,688	39,688	Υπολογισμός
Συνολική Παραγωγή Λιπιδίων	m ³ /έτος	51,771	23,524	Υπολογισμός
Συνολική Παραγωγή Βιοντίζελ	τόνοι/έτος	45,798	20,810	Υπολογισμός
Λειτουργία Μονάδας				
Ιδιότητα	Μονάδες	base	projected	Πηγή
Συνολική Εξάτμιση Νερού	m ³ /ημέρα	2,205	601	Υπολογισμός
Συνολική Κατανάλωση Ηλεκτρισμού	MWh/έτος	151,212	151,212	Υπολογισμός
Σύνολο Εργαζομένων	εργαζόμεν	159	43	Υπολογισμός

Όγκος Αντιδραστήρα	οι m ³	308,686	84,187	Υπολογισμός
Ετήσια Λειτουργία	Ημέρες	300	330	Παραδοχή

Ανάλυση Κόστους Μονάδας

Ιδιότητα	Μονάδες	base	projected	Πηγή
Κόστος Ηλεκτρισμού	€/έτος	9,659.42	9,659.42	Υπολογισμός
Κόστος Νερού	€/έτος	881,959.93	216,481.07	Υπολογισμός
Κόστος Θρεπτικών Συστατικών	€/έτος	19,050.33	793.76	Υπολογισμός
Κόστος Συλλογής	€/έτος	107,158.13	45,244.54	Υπολογισμός
Συνολικό Λειτουργικό Κόστος Μονάδας	€/έτος	357,193.77	150,815.15	Υπολογισμός
Συνολικό Λειτουργικό Κόστος Μονάδας	€/έτος	1,027,827.47	432,993.60	Υπολογισμός
Κόστος Παραγωγής 1 kg Βιόμαζας Μικροφυκών	€/έτος	9.00	3.80	Υπολογισμός
Κόστος Αγοράς Γης	€	15,654,788.71	2,140,757.28	Υπολογισμός
Κόστος Αντιδραστήρα	€	630,601,347.91	28,864,143.07	Υπολογισμός
Πάγιο Κόστος Συστήματος	€	631,924,287.80	29,176,837.95	Υπολογισμός
Συνολικό Πάγιο Κόστος Μονάδας	€	1,278,180,424.41	60,181,738.30	Υπολογισμός
Συνολικό Πάγιο Κόστος Μονάδας	€	1,262,525,635.70	58,040,981.02	Υπολογισμός
Συνολικά Έσοδα από Βιοντίζελ	€	18,319.01	10,404.92	Υπολογισμός

Αναερόβια Χώνευση - Παραγωγή Βιοαερίου & Ηλεκτρισμού

Ιδιότητα	Μονάδες	base	projected	Πηγή
Παραγωγή CH ₄ (θεωρητική)	m ³ /έτος	6.75	14.11	Υπολογισμός
Παραγωγή NH ₃ (θεωρητική)	kg/έτος	509.00	964.42	Υπολογισμός
Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας	MWh/έτος	79,253	158,308	Υπολογισμός
Πλεόνασμα/Ελλειμμα Ηλεκτρικής Ενέργειας	MWh/έτος	-71,959	7,096	Υπολογισμός

Περιβαλλοντική Αποτίμηση Λειτουργίας Μονάδας

Ιδιότητα	Μονάδες	base	projected	Πηγή
Εκπομπές CO ₂ από τη λειτουργία της μονάδας	τόνοι CO ₂ /τόνοι βιοντίζελ	2,032,037	22,058	Υπολογισμός
Ισοζύγιο CO ₂ (Παροχή- Εκπομπές)	τόνοι CO ₂	-1,926,777	83,202	Υπολογισμός

Ανάλυση Βιωσιμότητας Μονάδας				
<i>Αποτίμηση Κέρδους/Ζημιάς χωρίς επιδότηση CO₂</i>				
Ιδιότητα	Μονάδες	base	projected	Πηγή
<i>Κέρδος/Ζημιά Λειτουργίας Μονάδας</i>	€/έτος	-1,009,508.46	-422,588.68	Υπολογισμός
<i>Κέρδος/Ζημιά Λειτουργίας Μονάδας</i>	€/έτος	-338,874.76	-140,410.23	Υπολογισμός
<i>Ελάχιστη Απαιτούμενη Επιδότηση Δέσμευσης CO₂ για Ισορροπία Κέρδους/Ζημιάς</i>				
Ιδιότητα	Μονάδες	base	projected	Πηγή
<i>Επιδότηση CO₂</i>	€/τόνο CO ₂	13.90	5.82	Υπολογισμός
<i>Επιδότηση CO₂</i>	€/τόνο CO ₂	4.67	1.93	Υπολογισμός
<i>Συνολικά Έσοδα από Πώληση Βιοντίζελ και Δέσμευση CO₂</i>	€/έτος	1,009,508.46	422,588.68	Υπολογισμός
<i>Συνολικά Έσοδα από Πώληση Βιοντίζελ και Δέσμευση CO₂</i>	€/έτος	338,874.76	140,410.23	Υπολογισμός
<i>Κέρδος/Ζημιά Λειτουργίας Μονάδας</i>	€/έτος	0.00	0.00	Απαίτηση
<i>Κέρδος/Ζημιά Λειτουργίας Μονάδας</i>	€/έτος	0.00	0.00	Απαίτηση
<i>Ελάχιστη Απαιτούμενη Επιδότηση Δέσμευσης CO₂ για Ταχεία Απόσβεση Αρχικού Κεφαλαίου</i>				
Ιδιότητα	Μονάδες	base	projected	Πηγή
<i>Επιδότηση CO₂</i>	€/τόνο CO ₂	351.72	16.43	Υπολογισμός
<i>Επιδότηση CO₂</i>	€/τόνο CO ₂	347.41	15.84	Υπολογισμός
<i>Συνολικά Έσοδα από Δέσμευση CO₂</i>	€/έτος	25,545,289.47	1,193,229.84	Υπολογισμός
<i>Συνολικά Έσοδα από Δέσμευση CO₂</i>	€/έτος	25,232,193.70	1,150,414.70	Υπολογισμός
<i>Κέρδος/Ζημιά Λειτουργίας Μονάδας</i>	€/έτος	25,563,608.49	1,203,634.77	Υπολογισμός
<i>Κέρδος/Ζημιά Λειτουργίας Μονάδας</i>	€/έτος	25,250,512.71	1,160,819.62	Υπολογισμός
<i>Χρόνος Απόσβεσης Εξοπλισμού (Σε Περίπτωση Κέρδους)</i>	έτη	50.00	50.00	Απαίτηση
<i>Χρόνος Απόσβεσης Εξοπλισμού (Σε Περίπτωση Κέρδους)</i>	έτη	50.00	50.00	Απαίτηση

Πίνακας Π.17

Σενάριο 4B

Χαμηλή Παραγωγή CO₂

Σάμος (Ανοικτή Λίμνη)

Χαρακτηριστικά Περιοχής				
Ιδιότητα	Μονάδες	base	projected	Πηγή
Ηλιοφάνεια	kWh/m ² /έτος	2,110	2,110	http://ec.europa.eu
Πληθυσμός	Κάτοικοι	32,759	32,759	Εθνική Απογραφή 2010
Συνολική Έκταση	στρέμματα	780,600	780,600	http://www.geodata.gov.gr
Μη Χρησιμοποιούμενη Έκταση	στρέμματα	36,800	36,800	http://www.geodata.gov.gr
Εκπομπές CO ₂	τόνοι/έτος	105,260	105,260	http://carma.org
Απαιτήσεις Πρώτων Υλών Μονάδας				
Ιδιότητα	Μονάδες	base	projected	Πηγή
Συνολική Ποσότητα Απαιτούμενου CO ₂	τόνοι/έτος	105,260	105,260	Υπολογισμός
Συνολική Ποσότητα Δεσμευμένου CO ₂	τόνοι/έτος	21,052	21,052	Υπολογισμός
Κλάσμα Παροχής CO ₂ από Μονάδα ΔΕΗ	%	100.00	100.00	Βάση Αναφοράς
Ποσοστό Δέσμευσης CO ₂ από Μονάδα ΔΕΗ	%	20.00	20.00	Υπολογισμός
Θρεπτικά Συστατικά	kg/έτος	3,451	3,451	Υπολογισμός
Συνολική Έκταση	m ²	3,834,608	1,743,004	Υπολογισμός
Συνολική Έκταση	στρέμματα	3,834.61	1,743.00	Υπολογισμός
Παραγωγικότητα Μονάδας				
Ιδιότητα	Μονάδες	base	projected	Πηγή
Συνολική Παραγωγή Βιόμαζας Μικροφυκών	τόνοι/έτος	11,504	11,504	Υπολογισμός
Συνολική Παραγωγή Λιπιδίων	m ³ /έτος	22,509	17,047	Υπολογισμός
Συνολική Παραγωγή Βιοντίζελ	τόνοι/έτος	19,912	15,080	Υπολογισμός
Λειτουργία Μονάδας				
Ιδιότητα	Μονάδες	base	projected	Πηγή
Συνολική Εξάτμιση Νερού	m ³ /ημέρα	38,346	17,430	Υπολογισμός
Συνολική Κατανάλωση Ηλεκτρισμού	MWh/έτος	8,225	8,225	Υπολογισμός
Σύνολο Εργαζομένων	εργαζόμενοι	69	24	Υπολογισμός

Όγκος Αντιδραστήρα	m ³	958,652	435,751	Υπολογισμός
Ετήσια Λειτουργία	Ημέρες	300	330	Παραδοχή (AquaFUELS)

Ανάλυση Κόστους Μονάδας

Ιδιότητα	Μονάδες	base	projected	Πηγή
Κόστος Ηλεκτρισμού	€/έτος	525,428.01	525,428.01	Υπολογισμός
Κόστος Νερού	€/έτος	766,921.68	313,740.69	Υπολογισμός
Κόστος Θρεπτικών Συστατικών	€/έτος	5,568.63	192.02	Υπολογισμός
Κόστος Συλλογής	€/έτος	2,588.36	1,035.34	Υπολογισμός
Συνολικό Λειτουργικό Κόστος Μονάδας	€/έτος	8,627.87	3,451.15	Υπολογισμός
Συνολικό Λειτουργικό Κόστος Μονάδας	€/έτος	1,853,069.34	1,387,782.00	Υπολογισμός
Κόστος Παραγωγής 1 kg Βιόμαζας Μικροφυκών	€/έτος	0.75	0.30	Υπολογισμός
Κόστος Αγοράς Γης	€	3,834,608.38	174,300.38	Υπολογισμός
Κόστος Αντιδραστήρα	€	54,834,899.82	13,944,030.47	Υπολογισμός
Πάγιο Κόστος Συστήματος	€	55,985,282.33	14,397,211.46	Υπολογισμός
Συνολικό Πάγιο Κόστος Μονάδας	€	114,654,790.53	28,515,542.31	Υπολογισμός
Συνολικό Πάγιο Κόστος Μονάδας	€	110,820,182.15	28,341,241.93	Υπολογισμός
Συνολικά Έσοδα από Βιοντίζελ	€	7,964.79	7,539.80	Υπολογισμός

Αναερόβια Χώνευση - Παραγωγή Βιοαερίου & Ηλεκτρισμού

Ιδιότητα	Μονάδες	base	projected	Πηγή
Παραγωγή CH ₄ (θεωρητική)	m ³ /έτος	1.96	4.09	Υπολογισμός
Παραγωγή NH ₃ (θεωρητική)	kg/έτος	147.54	279.54	Υπολογισμός
Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας	MWh/έτος	22,972	45,886	Υπολογισμός
Πλεόνασμα/Έλλειμμα Ηλεκτρικής Ενέργειας	MWh/έτος	14,747	37,661	Υπολογισμός

Περιβαλλοντική Αποτίμηση Λειτουργίας Μονάδας

Ιδιότητα	Μονάδες	base	projected	Πηγή
Εκπομπές CO ₂ από τη λειτουργία της μονάδας	τόνοι CO ₂ /τόνοι βιοντίζελ	307,839	5,278	Υπολογισμός
Ισοζύγιο CO ₂ (Παροχή- Εκπομπές)	τόνοι CO ₂	-202,579	99,982	Υπολογισμός

Ανάλυση Βιωσιμότητας Μονάδας				
<i>Αποτίμηση Κέρδους/Ζημιάς χωρίς επιδότηση CO₂</i>				
Ιδιότητα	Μονάδες	base	projected	Πηγή
Κέρδος/Ζημιά Λειτουργίας Μονάδας	€/έτος	-1,845,104.55	-1,380,242.20	Υπολογισμός
Κέρδος/Ζημιά Λειτουργίας Μονάδας	€/έτος	-663.08	4,088.65	Υπολογισμός
<i>Ελάχιστη Απαιτούμενη Επιδότηση Δέσμευσης CO₂ για Ισορροπία Κέρδους/Ζημιάς</i>				
Ιδιότητα	Μονάδες	base	projected	Πηγή
Επιδότηση CO₂	€/τόνο CO ₂	87.65	65.56	Υπολογισμός
Επιδότηση CO ₂	€/τόνο CO ₂	0.03	0.00	Υπολογισμός
Συνολικά Έσοδα από Πώληση Βιοντίζελ και Δέσμευση CO₂	€/έτος	1,845,104.55	1,380,242.20	Υπολογισμός
Συνολικά Έσοδα από Πώληση Βιοντίζελ και Δέσμευση CO ₂	€/έτος	663.08	-4,088.65	Υπολογισμός
Κέρδος/Ζημιά Λειτουργίας Μονάδας	€/έτος	0.00	0.00	Απαίτηση
Κέρδος/Ζημιά Λειτουργίας Μονάδας	€/έτος	0.00	0.00	Απαίτηση
<i>Ελάχιστη Απαιτούμενη Επιδότηση Δέσμευσης CO₂ για Ταχεία Απόσβεση Αρχικού Κεφαλαίου</i>				
Ιδιότητα	Μονάδες	base	projected	Πηγή
Επιδότηση CO₂	€/τόνο CO ₂	108.55	26.73	Υπολογισμός
Επιδότηση CO ₂	€/τόνο CO ₂	104.90	26.57	Υπολογισμός
Συνολικά Έσοδα από Δέσμευση CO₂	€/έτος	2,285,131.02	562,771.05	Υπολογισμός
Συνολικά Έσοδα από Δέσμευση CO ₂	€/έτος	2,208,438.85	559,285.04	Υπολογισμός
Κέρδος/Ζημιά Λειτουργίας Μονάδας	€/έτος	2,293,095.81	570,310.85	Υπολογισμός
Κέρδος/Ζημιά Λειτουργίας Μονάδας	€/έτος	2,216,403.64	566,824.84	Υπολογισμός
Χρόνος Απόσβεσης Εξοπλισμού (Σε Περίπτωση Κέρδους)	έτη	50.00	50.00	Απαίτηση
Χρόνος Απόσβεσης Εξοπλισμού (Σε Περίπτωση Κέρδους)	έτη	50.00	50.00	Απαίτηση

Πίνακας Π.18

Σενάριο 5A

Πολύ Χαμηλή Παραγωγή CO₂

Μήλος (PBR)

Χαρακτηριστικά Περιοχής				
Ιδιότητα	Μονάδες	base	projected	Πηγή
Ηλιοφάνεια	kWh/m ² /έτος	2,120	2,120	http://ec.europa.eu
Πληθυσμός	Κάτοικοι	4,959	4,959	Εθνική Απογραφή 2010
Συνολική Έκταση	στρέμματα	167,700	167,700	http://www.geodata.gov.gr
Μη Χρησιμοποιούμενη Έκταση	στρέμματα	13,800	13,800	http://www.geodata.gov.gr
Εκπομπές CO ₂	τόνοι/έτος	8,038	8,038	http://carma.org
Απαιτήσεις Πρώτων Υλών Μονάδας				
Ιδιότητα	Μονάδες	base	projected	Πηγή
Συνολική Ποσότητα Απαιτούμενου CO ₂	τόνοι/έτος	8,038	8,038	Υπολογισμός
Συνολική Ποσότητα Δεσμευμένου CO ₂	τόνοι/έτος	5,546	5,546	Υπολογισμός
Κλάσμα Παροχής CO ₂ από Μονάδα ΔΕΗ	%	100.00	100.00	Βάση Αναφοράς
Ποσοστό Δέσμευσης CO ₂ από Μονάδα ΔΕΗ	%	69.00	69.00	Υπολογισμός
Θρεπτικά Συστατικά	kg/έτος	1,212	1,212	Υπολογισμός
Συνολική Έκταση	m ²	336,747	91,840	Υπολογισμός
Συνολική Έκταση	στρέμματα	336.75	91.84	Υπολογισμός
Παραγωγικότητα Μονάδας				
Ιδιότητα	Μονάδες	base	projected	Πηγή
Συνολική Παραγωγή Βιόμαζας Μικροφυκών	τόνοι/έτος	3,031	3,031	Υπολογισμός
Συνολική Παραγωγή Λιπιδίων	m ³ /έτος	3,953	1,796	Υπολογισμός
Συνολική Παραγωγή Βιοντίζελ	τόνοι/έτος	3,497	1,589	Υπολογισμός
Λειτουργία Μονάδας				
Ιδιότητα	Μονάδες	base	projected	Πηγή
Συνολική Εξάτμιση Νερού	m ³ /ημέρα	168	46	Υπολογισμός
Συνολική Κατανάλωση Ηλεκτρισμού	MWh/έτος	11,547	11,547	Υπολογισμός
Σύνολο Εργαζομένων	εργαζόμενοι	12	3	Υπολογισμός
Όγκος Αντιδραστήρα	m ³	23,572	6,429	Υπολογισμός

Ετήσια Λειτουργία	Ημέρες	300	330	Παραδοχή
Ανάλυση Κόστους Μονάδας				
Ιδιότητα	Μονάδες	base	projected	Πηγή
Κόστος Ηλεκτρισμού	€/έτος	737.63	737.63	Υπολογισμός
Κόστος Νερού	€/έτος	67,349.36	16,531.21	Υπολογισμός
Κόστος Θρεπτικών Συστατικών	€/έτος	1,454.75	60.61	Υπολογισμός
Κόστος Συλλογής	€/έτος	8,182.95	3,455.02	Υπολογισμός
Συνολικό Λειτουργικό Κόστος Μονάδας	€/έτος	27,276.49	11,516.74	Υπολογισμός
Συνολικό Λειτουργικό Κόστος Μονάδας	€/έτος	78,488.29	33,064.82	Υπολογισμός
Κόστος Παραγωγής 1 kg Βιόμαζας Μικροφυκών	€/έτος	9.00	3.80	Υπολογισμός
Κόστος Αγοράς Γης	€	1,195,451.18	163,475.27	Υπολογισμός
Κόστος Αντιδραστήρα	€	48,154,794.17	2,204,160.95	Υπολογισμός
Πάγιο Κόστος Συστήματος	€	48,255,818.21	2,228,039.36	Υπολογισμός
Συνολικό Πάγιο Κόστος Μονάδας	€	97,606,063.57	4,595,675.59	Υπολογισμός
Συνολικό Πάγιο Κόστος Μονάδας	€	96,410,612.39	4,432,200.32	Υπολογισμός
Συνολικά Έσοδα από Βιοντίζελ	€	1,398.90	794.55	Υπολογισμός

Αναερόβια Χώνευση - Παραγωγή Βιοαερίου & Ηλεκτρισμού

Ιδιότητα	Μονάδες	base	projected	Πηγή
Παραγωγή CH ₄ (θεωρητική)	m ³ /έτος	0.52	1.08	Υπολογισμός
Παραγωγή NH ₃ (θεωρητική)	kg/έτος	38.87	73.65	Υπολογισμός
Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας	MWh/έτος	6,052	12,089	Υπολογισμός
Πλεόνασμα/Ελλειμμα Ηλεκτρικής Ενέργειας	MWh/έτος	-5,495	542	Υπολογισμός

Περιβαλλοντική Αποτίμηση Λειτουργίας Μονάδας

Ιδιότητα	Μονάδες	base	projected	Πηγή
Εκπομπές CO ₂ από τη λειτουργία της μονάδας	τόνοι CO ₂ /τόνοι βιοντίζελ	155,173	1,684	Υπολογισμός
Ισοζύγιο CO ₂ (Παροχή-Εκπομπές)	τόνοι CO ₂	-147,135	6,354	Υπολογισμός

Ανάλυση Βιωσιμότητας Μονάδας

Αποτίμηση Κέρδους/Ζημιάς χωρίς επιδότηση CO₂

Ιδιότητα	Μονάδες	base	projected	Πηγή
----------	---------	------	-----------	------

<i>Κέρδος/Ζημιά Λειτουργίας Μονάδας</i>	€/έτος	-77,089.39	-32,270.26	Υπολογισμός
<i>Κέρδος/Ζημιά Λειτουργίας Μονάδας</i>	€/έτος	-25,877.59	-10,722.19	Υπολογισμός
<i>Ελάχιστη Απαιτούμενη Επιδότηση Δέσμευσης CO₂ για Ισορροπία Κέρδους/Ζημιάς</i>				
Ιδιότητα	Μονάδες	base	projected	Πηγή
Επιδότηση CO ₂	€/τόνο CO ₂	13.90	5.82	Υπολογισμός
Επιδότηση CO ₂	€/τόνο CO ₂	4.67	1.93	Υπολογισμός
Συνολικά Έσοδα από Πώληση Βιοντίζελ και Δέσμευση CO ₂	€/έτος	77,089.39	32,270.26	Υπολογισμός
Συνολικά Έσοδα από Πώληση Βιοντίζελ και Δέσμευση CO ₂	€/έτος	25,877.59	10,722.19	Υπολογισμός
<i>Κέρδος/Ζημιά Λειτουργίας Μονάδας</i>	€/έτος	0.00	0.00	Απαίτηση
<i>Κέρδος/Ζημιά Λειτουργίας Μονάδας</i>	€/έτος	0.00	0.00	Απαίτηση
<i>Ελάχιστη Απαιτούμενη Επιδότηση Δέσμευσης CO₂ για Ταχεία Απόσβεση Αρχικού Κεφαλαίου</i>				
Ιδιότητα	Μονάδες	base	projected	Πηγή
Επιδότηση CO ₂	€/τόνο CO ₂	351.72	16.43	Υπολογισμός
Επιδότηση CO ₂	€/τόνο CO ₂	347.41	15.84	Υπολογισμός
Συνολικά Έσοδα από Δέσμευση CO ₂	€/έτος	1,950,722.37	91,118.96	Υπολογισμός
Συνολικά Έσοδα από Δέσμευση CO ₂	€/έτος	1,926,813.35	87,849.45	Υπολογισμός
<i>Κέρδος/Ζημιά Λειτουργίας Μονάδας</i>	€/έτος	1,952,121.27	91,913.51	Υπολογισμός
<i>Κέρδος/Ζημιά Λειτουργίας Μονάδας</i>	€/έτος	1,928,212.25	88,644.01	Υπολογισμός
<i>Χρόνος Απόσβεσης Εξοπλισμού (Σε Περίπτωση Κέρδους)</i>	έτη	50.00	50.00	Απαίτηση
<i>Χρόνος Απόσβεσης Εξοπλισμού (Σε Περίπτωση Κέρδους)</i>	έτη	50.00	50.00	Απαίτηση

Πίνακας Π.19

Σενάριο 5B

Πολύ Χαμηλή Παραγωγή CO₂

Μήλος (Ανοικτή Λίμνη)

Χαρακτηριστικά Περιοχής				
Ιδιότητα	Μονάδες	base	projected	Πηγή
Ηλιοφάνεια	kWh/m ² /έτος	2,120	2,120	http://ec.europa.eu
Πληθυσμός	Κάτοικοι	4,959	4,959	Εθνική Απογραφή 2010
Συνολική Έκταση	στρέμματα	167,700	167,700	http://www.geodata.gov.gr
Μη Χρησιμοποιούμενη Έκταση	στρέμματα	13,800	13,800	http://www.geodata.gov.gr
Εκπομπές CO ₂	τόνοι/έτος	8,038	8,038	http://carma.org
Απαιτήσεις Πρώτων Υλών Μονάδας				
Ιδιότητα	Μονάδες	base	projected	Πηγή
Συνολική Ποσότητα Απαιτούμενου CO ₂	τόνοι/έτος	8,038	8,038	Υπολογισμός
Συνολική Ποσότητα Δεσμευμένου CO ₂	τόνοι/έτος	1,608	1,608	Υπολογισμός
Κλάσμα Παροχής CO ₂ από Μονάδα ΔΕΗ	%	100.00	100.00	Βάση Αναφοράς
Ποσοστό Δέσμευσης CO ₂ από Μονάδα ΔΕΗ	%	20.00	20.00	Υπολογισμός
Θρεπτικά Συστατικά	kg/έτος	264	264	Υπολογισμός
Συνολική Έκταση	m ²	292,823	133,102	Υπολογισμός
Συνολική Έκταση	στρέμματα	292.82	133.10	Υπολογισμός
Παραγωγικότητα Μονάδας				
Ιδιότητα	Μονάδες	base	projected	Πηγή
Συνολική Παραγωγή Βιόμαζας Μικροφυκών	τόνοι/έτος	878	878	Υπολογισμός
Συνολική Παραγωγή Λιπιδίων	m ³ /έτος	1,719	1,302	Υπολογισμός
Συνολική Παραγωγή Βιοντίζελ	τόνοι/έτος	1,521	1,152	Υπολογισμός
Λειτουργία Μονάδας				
Ιδιότητα	Μονάδες	base	projected	Πηγή
Συνολική Εξάτμιση Νερού	m ³ /ημέρα	2,928	1,331	Υπολογισμός
Συνολική Κατανάλωση Ηλεκτρισμού	MWh/έτος	628	628	Υπολογισμός
Σύνολο Εργαζομένων	εργαζόμενοι	5	2	Υπολογισμός
Όγκος Αντιδραστήρα	m ³	73,206	33,275	Υπολογισμός

Ετήσια Λειτουργία	Ημέρες	300	330	Παραδοχή (AquaFUELS)
-------------------	--------	------------	------------	----------------------

Ανάλυση Κόστους Μονάδας

Ιδιότητα	Μονάδες	base	projected	Πηγή
Κόστος Ηλεκτρισμού	€/έτος	40,123.41	40,123.41	Υπολογισμός
Κόστος Νερού	€/έτος	58,564.66	23,958.27	Υπολογισμός
Κόστος Θρεπτικών Συστατικών	€/έτος	425.24	14.66	Υπολογισμός
Κόστος Συλλογής	€/έτος	197.66	79.06	Υπολογισμός
Συνολικό Λειτουργικό Κόστος Μονάδας	€/έτος	658.85	263.54	Υπολογισμός
Συνολικό Λειτουργικό Κόστος Μονάδας	€/έτος	141,506.47	105,975.60	Υπολογισμός
Κόστος Παραγωγής 1 kg Βιόμαζας Μικροφυκών	€/έτος	0.75	0.30	Υπολογισμός
Κόστος Αγοράς Γης	€	292,823.32	13,310.15	Υπολογισμός
Κόστος Αντιδραστήρα	€	4,187,373.41	1,064,812.05	Υπολογισμός
Πάγιο Κόστος Συστήματος	€	4,275,220.40	1,099,418.45	Υπολογισμός
Συνολικό Πάγιο Κόστος Μονάδας	€	8,755,417.12	2,177,540.65	Υπολογισμός
Συνολικό Πάγιο Κόστος Μονάδας	€	8,462,593.81	2,164,230.50	Υπολογισμός
Συνολικά Έσοδα από Βιοντίζελ	€	608.22	575.76	Υπολογισμός

Αναερόβια Χώνευση - Παραγωγή Βιοαερίου & Ηλεκτρισμού

Ιδιότητα	Μονάδες	base	projected	Πηγή
Παραγωγή CH ₄ (θεωρητική)	m ³ /έτος	0.15	0.31	Υπολογισμός
Παραγωγή NH ₃ (θεωρητική)	kg/έτος	11.27	21.35	Υπολογισμός
Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας	MWh/έτος	1,754	3,504	Υπολογισμός
Πλεόνασμα/Ελλείμμα Ηλεκτρικής Ενέργειας	MWh/έτος	1,126	2,876	Υπολογισμός

Περιβαλλοντική Αποτίμηση Λειτουργίας Μονάδας

Ιδιότητα	Μονάδες	base	projected	Πηγή
Εκπομπές CO ₂ από τη λειτουργία της μονάδας	τόνοι CO ₂ /τόνοι βιοντίζελ	23,508	403	Υπολογισμός
Ισοζύγιο CO ₂ (Παροχή-Εκπομπές)	τόνοι CO ₂	-15,470	7,635	Υπολογισμός

Ανάλυση Βιωσιμότητας Μονάδας

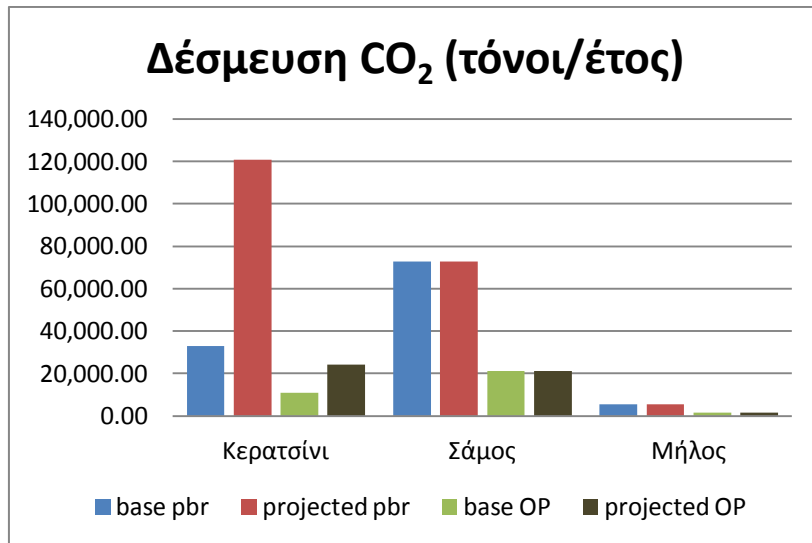
Αποτίμηση Κέρδους/Ζημιάς χωρίς επιδότηση CO₂

Ιδιότητα	Μονάδες	base	projected	Πηγή
----------	---------	------	-----------	------

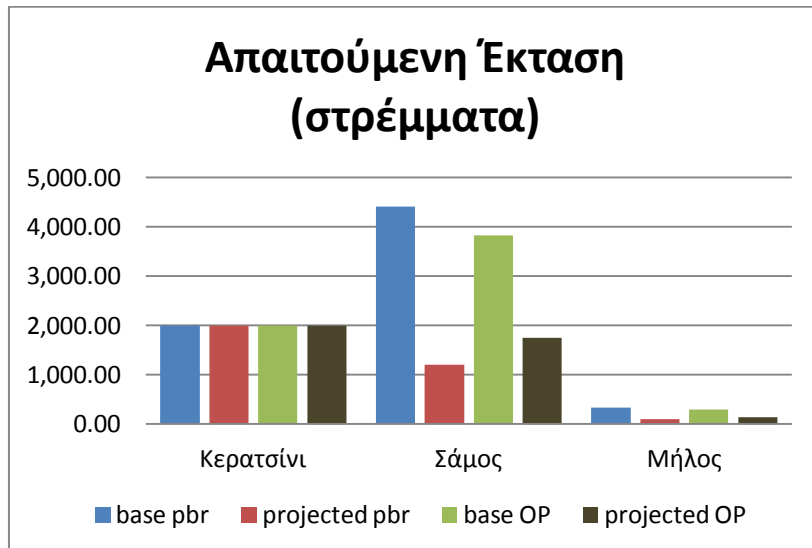
Κέρδος/Ζημιά Λειτουργίας Μονάδας	€/έτος	-140,898.26	-105,399.84	Υπολογισμός
Κέρδος/Ζημιά Λειτουργίας Μονάδας	€/έτος	-50.64	312.22	Υπολογισμός
<i>Ελάχιστη Απαιτούμενη Επιδότηση Δέσμευσης CO₂ για Ισορροπία Κέρδους/Ζημιάς</i>				
Ιδιότητα	Μονάδες	base	projected	Πηγή
Επιδότηση CO ₂	€/τόνο CO ₂	87.65	65.56	Υπολογισμός
Επιδότηση CO ₂	€/τόνο CO ₂	0.03	0.00	Υπολογισμός
Συνολικά Έσοδα από Πώληση Βιοντίζελ και Δέσμευση CO ₂	€/έτος	140,898.26	105,399.84	Υπολογισμός
Συνολικά Έσοδα από Πώληση Βιοντίζελ και Δέσμευση CO ₂	€/έτος	50.64	-312.22	Υπολογισμός
Κέρδος/Ζημιά Λειτουργίας Μονάδας	€/έτος	0.00	0.00	Απαίτηση
Κέρδος/Ζημιά Λειτουργίας Μονάδας	€/έτος	0.00	0.00	Απαίτηση
<i>Ελάχιστη Απαιτούμενη Επιδότηση Δέσμευσης CO₂ για Ταχεία Απόσβεση Αρχικού Κεφαλαίου</i>				
Ιδιότητα	Μονάδες	base	projected	Πηγή
Επιδότηση CO ₂	€/τόνο CO ₂	108.55	26.73	Υπολογισμός
Επιδότηση CO ₂	€/τόνο CO ₂	104.90	26.57	Υπολογισμός
Συνολικά Έσοδα από Δέσμευση CO ₂	€/έτος	174,500.12	42,975.05	Υπολογισμός
Συνολικά Έσοδα από Δέσμευση CO ₂	€/έτος	168,643.66	42,708.85	Υπολογισμός
Κέρδος/Ζημιά Λειτουργίας Μονάδας	€/έτος	175,108.34	43,550.81	Υπολογισμός
Κέρδος/Ζημιά Λειτουργίας Μονάδας	€/έτος	169,251.88	43,284.61	Υπολογισμός
Χρόνος Απόσβεσης Εξοπλισμού (Σε Περίπτωση Κέρδους)	έτη	50.00	50.00	Απαίτηση
Χρόνος Απόσβεσης Εξοπλισμού (Σε Περίπτωση Κέρδους)	έτη	50.00	50.00	Απαίτηση

Πίνακας Π.20

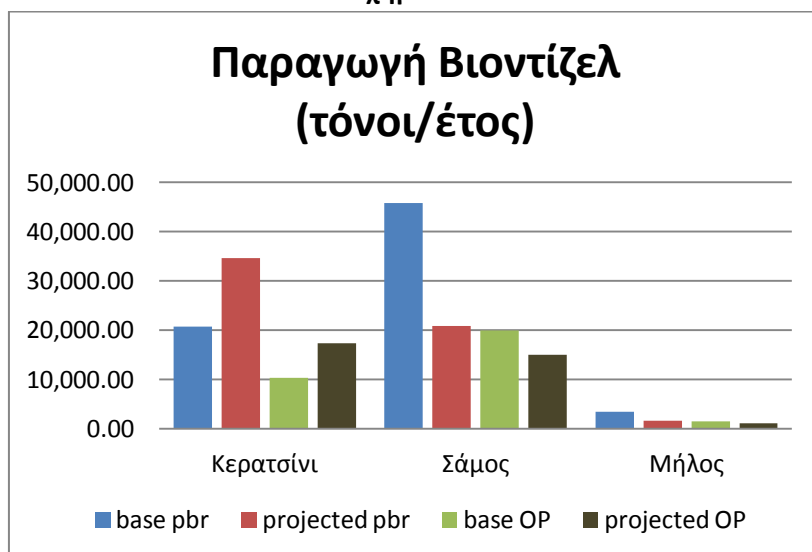
Διαγράμματα μόνο για τις περιπτώσεις: Κερατσίνι, Σάμος, Μήλος.



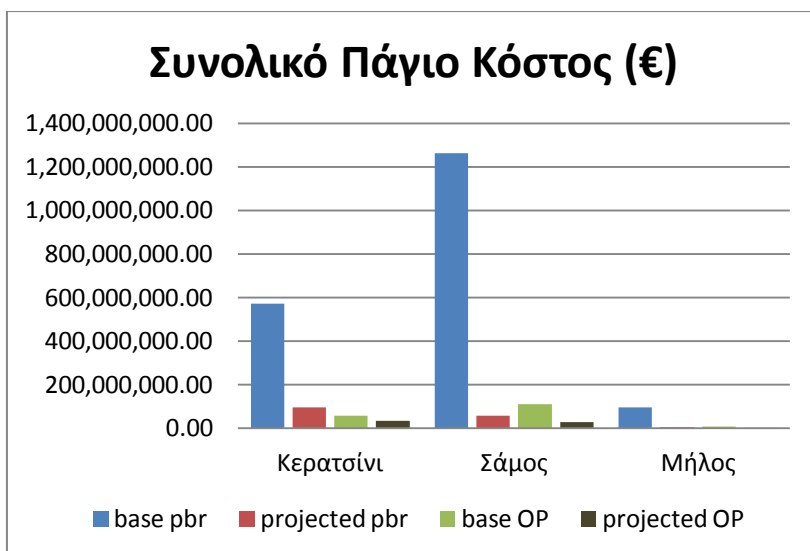
Σχήμα Π.3



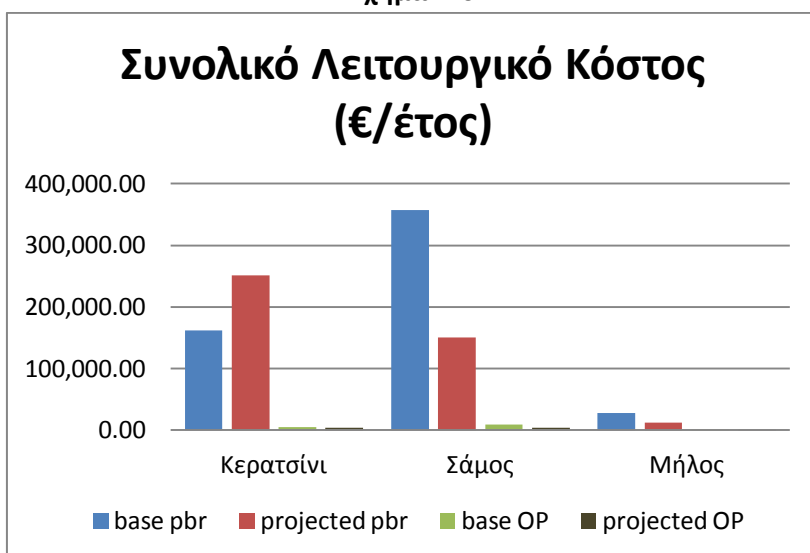
Σχήμα Π.4



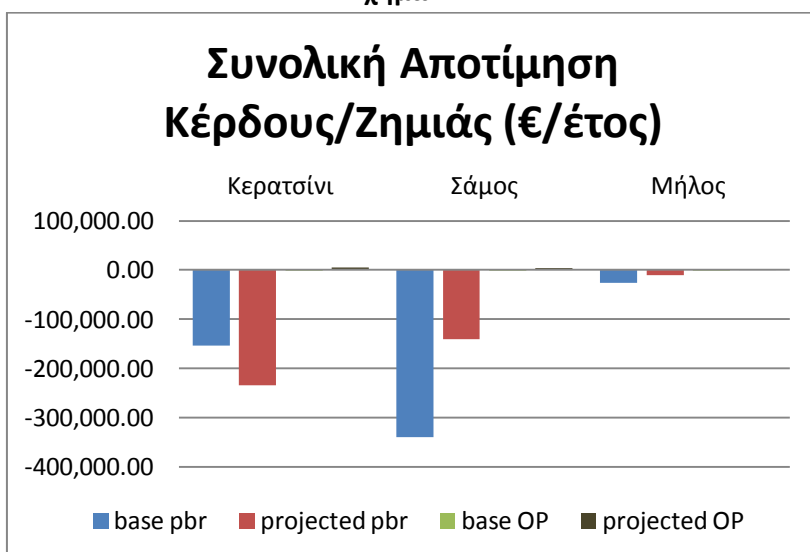
Σχήμα Π.5



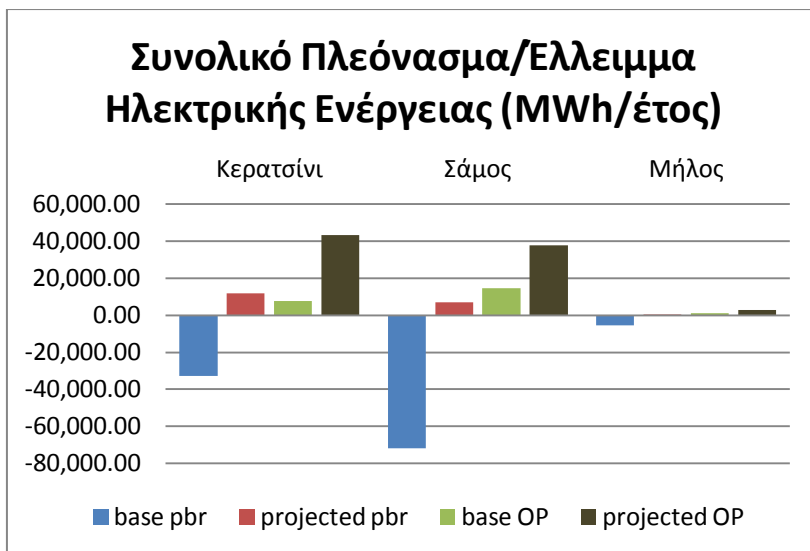
Σχήμα Π.6



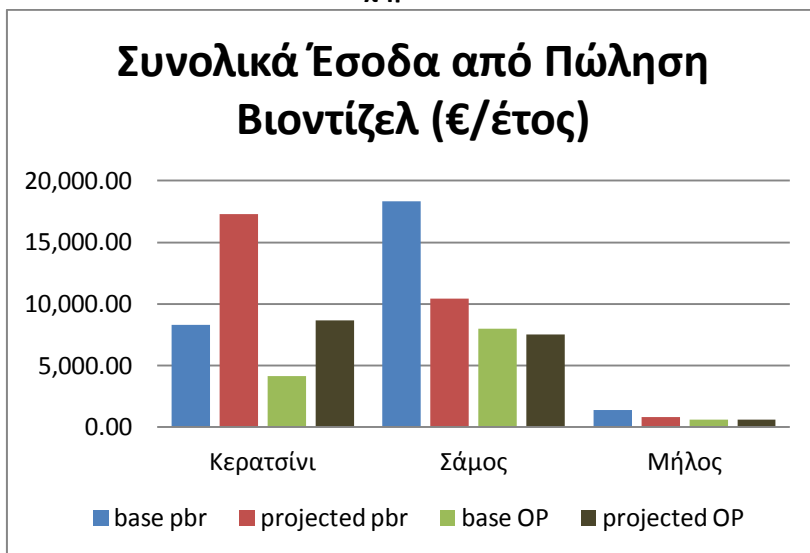
Σχήμα Π.7



Σχήμα Π.8



Σχήμα Π.9



Σχήμα Π.10

Κατανάλωση Ενέργειας και Εκπομπές CO₂ για την Παραγωγή Βιοντίζελ

Παράμετρος	Κατανάλωση Ενέργειας (MJ/MJ Βιοντίζελ)	Εκπομπές CO ₂ (g CO ₂ /MJ Βιοντίζελ)
<i>Αντιδραστήρας</i>		
Airlift PBR	0.3380	19.94
Επίπεδων Πάνελ	0.6050	35.70
Επίπεδων Πάνελ	1.4600	86.14
Ανοικτή Λίμνη	0.1210	7.14
Ανοικτή Λίμνη	0.0150	0.89
Ανοικτή Λίμνη	0.3280	19.35
Ανοικτή Λίμνη	0.7000	41.30
Ανοικτή Λίμνη	0.7890	46.55
Δακτυλοειδής PBR	13.7500	811.25
Δακτυλοειδής PBR	6.0800	358.72
<i>Συλλογή</i>		
Φυγοκέντριση	5.7430	338.84
Φυγοκέντριση	0.0640	3.78
Φυγοκέντριση	0.1570	9.26
Χημική Πήξη (Coagulation)	0.0056	0.33
Φιλτρόπρεσα	2.9160	172.04
Κροκίδωση	0.1320	7.79
Μικροφιλτράρισμα	2.6700	157.53
<i>Εξαγωγή Λιπιδίων</i>		
Εξάνιο	0.1650	9.74
Εξάνιο	0.1050	6.20
Εξάνιο : Αιθανόλη = 9 : 1	0.1080	6.37
<i>Μετεστεροποίηση</i>		
Μεθανόλη + Καταλύτης	0.0670	3.95
Μεθανόλη + Καταλύτης	0.0360	2.12
Μεθανόλη + NaOH	0.7600	4.48
Μεθανόλη + NaOH	0.0550	3.25
Μεθανόλη + NaOH	0.2370	13.98

Πίνακας Π.21