ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ

Τμήμα Χημικών Μηχανικών

ChemEngUP

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΟΝΑΔΑΣ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑΣ ΜΙΚΡΟΦΥΚΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΒΙΟΛΙΠΑΣΜΑΤΩΝ ΣΕ ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΑ ΑΝΟΙΚΤΟΥ ΤΥΠΟΥ



ΙΩΑΝΝΗΣ ΦΙΛΙΠΠΟΥΣΗΣ

Σεπτέμβριος 2026

ΤΜΗΜΑ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ – ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ – ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΟΝΑΔΑΣ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑΣ ΜΙΚΡΟΦΥΚΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΒΙΟΛΙΠΑΣΜΑΤΩΝ ΣΕ ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΑ ΑΝΟΙΧΤΟΥ ΤΥΠΟΥ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΤΟΥ
Ιωάννη Φιλιππούση

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: Μιχαήλ Κορνάρος

ΠΑΤΡΑ, ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2026

1. *Το σύνολο της εργασίας αποτελεί πρωτότυπο έργο, παραχθέν από εμένα, και δεν παραβιάζει δικαιώματα τρίτων καθ' οιονδήποτε τρόπο,*
2. *Εάν η εργασία περιέχει υλικό, το οποίο δεν έχει παραχθεί από εμένα, αυτό είναι ευδιάκριτο και αναφέρεται ρητώς εντός του κειμένου της εργασίας ως προϊόν εργασίας τρίτου, σημειώνοντας με παρομοίως σαφή τρόπο τα στοιχεία ταυτοποίησής του, ενώ παράλληλα βεβαιώνω πως στην περίπτωση χρήσης αυτούσιων γραφικών αναπαραστάσεων, εικόνων, γραφημάτων κλπ., έχω λάβει τη χωρίς περιορισμούς άδεια του κατόχου των πνευματικών δικαιωμάτων για την συμπερίληψη και επακόλουθη δημοσίευση του υλικού αυτό.*

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο πλαίσιο ολοκλήρωσης των προπτυχιακών μου σπουδών στο Εργαστήριο Βιοχημικής Μηχανικής και Τεχνολογίας Περιβάλλοντος του Τμήματος Χημικών Μηχανικών. Το αντικείμενό της επικεντρώνεται στον σχεδιασμό και την τεχνοοικονομική αξιολόγηση της διεργασίας παραγωγής βιολιπασμάτων από μικροφύκη σε ανοιχτού τύπου αντιδραστήρα, τόσο με συνθετική πηγή θρεπτικών συστατικών, όσο και χωνεμένου υπολείμματος αγροκτηνοτροφικής προέλευσης ως εναλλακτικού θρεπτικού μέσου. Η επιλογή του συγκεκριμένου θέματος βασίστηκε στο ιδιαίτερο ενδιαφέρον που παρουσιάζει η αξιοποίηση παραπροϊόντων και αποβλήτων στο πλαίσιο της κυκλικής οικονομίας, καθώς και στην ανάγκη ανάπτυξης περισσότερο βιώσιμων παραγωγικών διεργασιών.

Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στον επιβλέποντα καθηγητή μου, κύριο Μιχαήλ Κορνάρο για την επιστημονική καθοδήγηση και την υποστήριξη καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας. Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω επίσης στις Κατερίνα Κλαυδιανού και Ειρήνη Σβετζούρη για τη συνεχή βοήθεια, τις ουσιαστικές παρατηρήσεις και τη συμβολή τους στην εξέλιξη της μελέτης.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλα τα μέλη του Εργαστηρίου Βιοχημικής Τεχνολογίας και Τεχνολογίας Περιβάλλοντος για τη συνεργασία και την υποστήριξη που μου παρείχαν κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

1. ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ανάγκη για βιώσιμη διαχείριση οργανικών υπολειμμάτων και περιορισμό της εξάρτησης από συμβατικά λιπάσματα έχει ενισχύσει το ενδιαφέρον για την αξιοποίηση μικροφυκών σε γεωργικές εφαρμογές. Η παρούσα διπλωματική εργασία αφορά τον σχεδιασμό και την τεχνοοικονομική αξιολόγηση μονάδας παραγωγής βιομάζας Chlorella vulgaris για αξιοποίηση ως βιολίπασμα και βιοδιεγέρτης. Η καλλιέργεια πραγματοποιείται σε ανοικτή λίμνη τύπου raceway εντός θερμοκηπίου και εξετάζονται δύο σενάρια τροφοδοσίας θρεπτικών: χρήση ανόργανων πηγών στο Σενάριο 1 και προεπεξεργασμένου χωνεμένου υπολείμματος αναερόβιας χώνευσης (digestate) στο Σενάριο 2. Η παρουσία του digestate αυξάνει την εξασθένηση της φωτεινής ακτινοβολίας, οδηγώντας σε χαμηλότερη παραγωγικότητα και μεγαλύτερη απαιτούμενη επιφάνεια καλλιέργειας, ενώ παράλληλα περιορίζει την ανάγκη αγοράς συμβατικών θρεπτικών.

Η τεχνοοικονομική ανάλυση έδειξε ότι η αύξηση της παραγωγικής δυναμικότητας μειώνει το μοναδιαίο κόστος παραγωγής, με το πρόσθετο οικονομικό όφελος να περιορίζεται σταδιακά στις υψηλότερες δυναμικότητες. Η ελάχιστη τιμή ισοσκελισμού υπολογίστηκε σε περίπου $30.6\ €\ kg^{-1}$ για το Σενάριο 1 και $36.9\ €\ kg^{-1}$ για το Σενάριο 2, με αποτέλεσμα το πρώτο να εμφανίζεται οικονομικά ευνοϊκότερο υπό τις βασικές συνθήκες σχεδιασμού.

Η ανάλυση ευαισθησίας ανέδειξε την παραγωγικότητα ως κρίσιμη παράμετρο της οικονομικής επίδοσης. Όταν τα δύο σενάρια συγκρίνονται υπό την ίδια παραγωγικότητα, οι τιμές ισοσκελισμού συγκλίνουν σημαντικά, γεγονός που δείχνει ότι η υψηλότερη τιμή του Σεναρίου 2 στη βασική περίπτωση οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στη χαμηλότερη παραγωγικότητά του και όχι αποκλειστικά στη χρήση του digestate. Για παραγωγικότητα $20\ g\ m^{-2}d^{-1}$, η οικονομική επίδοση προσεγγίζει βιβλιογραφικά επίπεδα ακόμη και σε μέτριες παραγωγικές δυναμικότητες και μπορεί να θεωρηθεί απαιτητικός αλλά δυνητικά εφικτός στόχος υπό ευνοϊκές μεσογειακές συνθήκες. Αντίθετα, η παραγωγικότητα των $25\ g\ m^{-2}d^{-1}$ αποτελεί περισσότερο αισιόδοξο σενάριο, καθώς η μακροχρόνια επίτευξή της σε μεγάλης κλίμακας open raceway ponds δεν έχει τεκμηριωθεί επαρκώς.

2. SUMMARY

The need for the sustainable management of organic residues and for reducing dependence on conventional fertilizers has increased interest in the use of microalgae in agricultural applications. The present thesis focuses on the design and techno-economic evaluation of a Chlorella vulgaris biomass production facility intended for use as a biofertilizer and biostimulant. Cultivation is carried out in an open raceway pond located inside a greenhouse, and two nutrient-supply scenarios are examined: the use of inorganic nutrient sources in Scenario 1 and pretreated anaerobic digestion residue (digestate) in Scenario 2. The presence of digestate increases light attenuation within the cultivation medium, resulting in lower productivity and a larger required cultivation area, while at the same time reducing the need to purchase conventional nutrients. The techno-economic analysis showed that increasing the production capacity reduces the unit production cost, although the additional economic benefit gradually diminishes at higher capacities. The minimum break-even price was estimated at approximately $30.6\ €\ kg^{-1}$ for Scenario 1 and $36.9\ €\ kg^{-1}$ for Scenario 2, making Scenario 1 economically more favorable under the baseline design conditions.

The sensitivity analysis identified productivity as a critical parameter affecting the economic performance of the process. When the two scenarios are compared at the same productivity, their break-even prices converge significantly, indicating that the higher break-even price of Scenario 2 under the baseline conditions is largely attributed to its lower productivity rather than exclusively to the use of digestate. At a productivity of $20\ g\ m^{-2}d^{-1}$, the economic performance approaches values reported in the literature even at moderate production capacities and may be considered a demanding but potentially feasible target under favorable Mediterranean conditions. In contrast, a productivity of $25\ g\ m^{-2}d^{-1}$ represents a more optimistic scenario, since its long-term achievement in large-scale open raceway ponds has not yet been sufficiently demonstrated.

3. ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

Πρόλογος 1
1. Περίληψη 2
2. SUMMARY 3
3. ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ 4
4. ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ ΚΑΙ ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΩΝ 7
5. ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ 11
6. ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ 13
7. ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ 14
8. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ 16
8.1 Μικροφύκη 16
8.1.1 Χαρακτηριστικά Μικροφυκών 16
8.1.2 Κυτταρική ανάπτυξη μικροφυκών 17
8.1.3 Μεταβολικά μονοπάτια καλλιέργειας μικροφυκών 18
8.1.3.1 Σύγκριση μεταβολικών μονοπατιών μικροφυκών 18
8.2 Παράγοντες που επηρεάζουν την ανάπτυξη μικροφυκών 19
8.2.1 Θερμοκρασία 19
8.2.2 Φωτισμός 19
8.2.3 pH 20
8.2.4 Θρεπτικά συστατικά 22
8.2.5 Αερισμός και ανάδευση 22
8.3 Συστήματα καλλιέργειας 23
8.3.1 Ανοικτό σύστημα 23
8.3.1.1 Συστήματα εντός θερμοκηπίου 23
8.3.1.2 Σύστημα λίμνης (open raceway pond) 24
8.3.2 Κλειστό σύστημα 25
8.4 Παραγωγή βιολιπασμάτων από μικροφυκη 27
8.4.1 Βιολιπάσματα και βιοδιεγέρτες 27
8.4.2 Σύσταση βιολιπασμάτων και γεωργική αξία 28
8.4.3 Μηχανισμοί δράσης βιολιπασμάτων και επίδραση στην ανάπτυξη 28
8.5 Αναερόβια χώνευση 29
8.5.1 Διαδικασία αναερόβιας χώνευσης 29
8.5.2 Χαρακτηριστικά προϊόντων και σύσταση αναερόβιας χώνευσης 30
8.5.3 Αξιοποίηση προϊόντος αναερόβιας χώνευσης ως θρεπτικό μέσο 31
8.6 Τεχνοοικονομική αποτίμηση βιολογικών διεργασιών 31
8.6.1 Τεχνοοικονομική ανάλυση καλλιέργειας μικροφυκών σε ανοικτές λίμνες 32
9. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ 34
9.1 Βάση σχεδιασμού 34
9.1.1 Σκοπός και μεθοδολογική προσέγγιση 34

9.1.2 Συστήμα καλλιέργειας και δυναμικότητα ... 35
9.1.3 Επιλογή μεθόδου συγκομιδής και συμπύκνωσης ... 36
9.2 Περιγραφή της συνολικής διεργασίας ... 37
9.3 Στρατηγική και χρονικός προγραμματισμός της διεργασίας ... 39
9.4 Σχεδιασμός αντιδραστήρα ανοικτού τύπου ... 39
9.4.1 Αρχικές σχεδιαστικές παραδοχές ... 39
9.4.2 Προσδιορισμός μέσης έντασης φωτός ... 40
9.4.3 Προσδιορισμός μέσης θερμοκρασίας ... 42
9.4.4 Προσδιορισμός κινητικής ανάπτυξης μικροφυκών ... 44
9.4.5 Προσδιορισμός διαστάσεων λίμνης ... 46
9.5 Ισοζύγια μάζας ... 48
9.5.1 Ισοζύγιο μάζας νερού ... 48
9.5.2 Θρεπτικά συστατικά και παραγόμενη βιομάζα ... 50
9.5.3 Προεπεξεργασία χωνεμένου υπολείμματος ... 51
9.5.4 Ισοζύγια μάζας συμπύκνωσης και τελικής ξήρανσης ... 52
9.5.4.1 Ισοζύγια μάζας φίλτρων ... 52
9.5.4.2 Ισοζύγια μάζας φυγοκεντριτή τύπου decanter ... 52
9.5.4.3 Ισοζύγια μάζας χώρου φυσικής εξάτμισης ... 53
9.6 Ενεργειακή και θερμική ανάλυση ... 53
9.6.1 Ισοζύγια ενέργειας αντιδραστήρα ... 53
9.6.2 Ενεργειακά ισοζύγια θερμοκηπίου ... 56
9.7 Διαστασιολόγηση εξοπλισμού ... 62
9.7.1 Σχεδιασμός πτερυγίου του βιοαντιδραστήρα ... 62
9.7.2 Σχεδιασμός δεξαμενών αποθήκευσης ... 63
9.7.3 Σχεδιασμός αντλιών ... 64
9.7.4 Σχεδιασμός φίλτρων ... 65
9.7.5 Σχεδιασμός φυγοκέντρου τύπου decanter ... 66
9.7.6 Σχεδιασμός χώρου φυσικής ξήρανσης ... 67
9.7.7 Σχεδιασμός Screw press ... 68
10. ΤΕΧΝΟΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ... 70
10.1 Εκτίμηση κόστους αγοράς εξοπλισμού ... 70
10.2 Κόστος πάγιου κεφαλαίου (FCI) ... 72
10.3 Υπολογισμός συνολικού κόστους παραγωγής (TPC) ... 73
10.4 Επενδυτικό πλάνο ... 77
10.5 Καθαρή παρούσα αξία (NPV) ... 78
10.6 Επίδραση της δυναμικότητας στην τεχνοοικονομική απόδοση ... 79
10.7 Ανάλυση ευαισθησίας ... 83
11. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ... 85
12. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α ... 86
12.1 Εκτίμηση κόστους ... 86
12.1.1 Κατασκευή ανοιχτού αντιδραστήρα ... 86
12.1.2 Κόστος πτερυγίου (paddlewheel) ... 87
12.1.3 Κόστος θερμοκηπίου ... 88

12.1.4 Κόστος αντλιών 89
12.1.5 Κόστος συστήματος εξαερισμού 91
12.1.6 Κόστος Screw press 92
13. Βιβλιογραφία 94

4. ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ ΚΑΙ ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΩΝ

Συντομογραφία/Σύμβολο	Περιγραφή
A_m	Επιφάνεια καλλιέργειας της λίμνης
$A_{greenhouse}$	Επιφάνεια θερμοκηπίου
A_{filter}	Απαιτούμενη ενεργός επιφάνεια μεμβράνης
V_m	Ενεργός όγκος λίμνης
V_g	Όγκος αέρα στο εσωτερικό του θερμοκηπίου
H_{pond}	Λειτουργικό βάθος καλλιέργειας
L_m	Μήκος λίμνης
W_m	Πλάτος λίμνης
X	Συγκέντρωση μικροφυκικής βιομάζας
X_{target}	Επιθυμητή συγκέντρωση βιομάζας
X_{out}	Συγκέντρωση βιομάζας στην έξοδο
I_0	Προσπίπτουσα ένταση φωτεινής ακτινοβολίας
I_{avg}	Μέση διαθέσιμη ένταση ακτινοβολίας
k_0	Συνολικός συντελεστής εξασθένησης ακτινοβολίας
k_{dig}	Συνεισφορά του χωνεμένου υπολείμματος στην εξασθένηση της ακτινοβολίας
μ_{max}	Μέγιστος ειδικός ρυθμός ανάπτυξης μικροφυκών
Pr_{max}	Θεωρητική μέγιστη παραγωγικότητα βιομάζας
Pr_{real}	Πραγματική παραγωγικότητα βιομάζας
$\varphi(I_C)$	Συντελεστής επίδρασης της ακτινοβολίας στην ανάπτυξη
$\varphi(T_C)$	Συντελεστής επίδρασης της θερμοκρασίας στην ανάπτυξη
K_{sp}	Παράμετρος κορεσμού φωτεινής ακτινοβολίας

n	Εμπειρικός εκθέτης μοντέλου απόκρισης
T_{min}	Ελάχιστη θερμοκρασία ανάπτυξης
T_{max}	Μέγιστη θερμοκρασία ανάπτυξης
T_{opt}	Βέλτιστη θερμοκρασία ανάπτυξης
T_{pond}	Θερμοκρασία καλλιεργητικού μέσου
T_g	Θερμοκρασία αέρα θερμοκηπίου
T_{out}	Θερμοκρασία εξωτερικού περιβάλλοντος
T_s	Θερμοκρασία εδάφους
F_{in}	Εισερχόμενη παροχή καλλιεργητικού μέσου
F_{out}	Παροχή καλλιέργειας προς συγκομιδή
F_{evap}	Ογκομετρική απώλεια νερού λόγω εξάτμισης
m_{evap}	Μαζική παροχή εξατμιζόμενου νερού
Q	Ογκομετρική παροχή
Re	Αριθμός Reynolds
Sc	Αριθμός Schmidt
Sh	Αριθμός Sherwood
Nu	Αριθμός Nusselt
Pr	Αριθμός Prandtl
D_{water}	Συντελεστής διάχυσης υδρατμών στον αέρα
k_m	Συντελεστής μεταφοράς μάζας
u	Χαρακτηριστική ταχύτητα ροής
ν	Κινηματικό ιξώδες
μ	Δυναμικό ιξώδες
ρ_w	Πυκνότητα νερού
ρ_a	Πυκνότητα αέρα
ρ_s	Πυκνότητα εδάφους
$C_{p,w}$	Ειδική θερμοχωρητικότητα νερού
$C_{p,a}$	Ειδική θερμοχωρητικότητα αέρα
$C_{p,s}$	Ειδική θερμοχωρητικότητα εδάφους
Q_{rad}	Θερμική ροή λόγω ακτινοβολίας
Q_{conv}	Θερμική ροή λόγω συναγωγής

Q_{evap}	Θερμική απώλεια λόγω εξάτμισης
Q_{cond}	Θερμική ροή μέσω αγωγής
Q_{vent}	Θερμική ροή λόγω αερισμού
Q_{cover}	Θερμική ροή μέσω καλύμματος θερμοκηπίου
h_{conv}	Συντελεστής συναγωγής θερμότητας
U_g	Συνολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας θερμοκηπίου
L_w	Λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης νερού
ε_w	Συντελεστής εκπομπής επιφάνειας νερού
σ	Σταθερά Stefan–Boltzmann
τ_c	Διαπερατότητα καλύμματος θερμοκηπίου
W_p	Απαιτούμενη ισχύς πτερυγίου ανάδευσης
h_f	Γραμμικές απώλειες μανομετρικού ύψους
h_{loc}	Τοπικές απώλειες μανομετρικού ύψους
f	Συντελεστής τριβής Darcy
D_{pipe}	Εσωτερική διάμετρος σωλήνα
P_h	Υδραυλική ισχύς
P_{pump}	Απαιτούμενη ισχύς αντλίας
η_P	Βαθμός απόδοσης αντλίας
J	Επιφανειακή ροή διηθήματος μεμβράνης
u_g	Ταχύτητα καθίζησης σωματιδίων
$\Sigma_{decanter}$	Ισοδύναμη επιφάνεια καθίζησης φυγοκεντριτή
ω	Γωνιακή ταχύτητα περιστροφής
N	Ταχύτητα περιστροφής
MR	Λόγος υγρασίας
C_P	Συνολικό κόστος αγοράς εξοπλισμού
C_{RM}	Κόστος πρώτων υλών
C_{UT}	Κόστος βοηθητικών παροχών
C_{OL}	Κόστος άμεσης εργασίας
S	Ετήσια έσοδα από πωλήσεις
E	Ετήσια έξοδα
D	Απόσβεση
Φ	Φορολογικός συντελεστής
i	Συντελεστής προεξόφλησης
ATP	Τριφωσφορική αδενοσίνη
CAPEX	Κεφαλαιουχικές δαπάνες

CEPCI	Δείκτης Κόστους Εγκαταστάσεων Χημικής Μηχανικής
CF	Ταμειακή ροή
COD	Χημικά απαιτούμενο οξυγόνο
DC	Άμεσα κόστη
DM	Ξηρά ουσία
DNA	Δεοξυριβονουκλεϊκό οξύ
FC	Σταθερά κόστη
FCI	Συνολικό πάγιο κεφάλαιο
GE	Γενικά έξοδα
HRT	Υδραυλικός χρόνος παραμονής
IC	Έμμεσα κόστη
MARR	Ελάχιστος αποδεκτός βαθμός απόδοσης
NADPH	Ανήγμενο φωσφορικό νικοτιναμιδο-αδε-νινο-δινουκλεοτίδιο
NPV	Καθαρή Παρούσα Αξία
OD	Οπτική πυκνότητα
OPEX	Λειτουργικές δαπάνες
ORP	Ανοικτή λίμνη τύπου raceway
PBR	Φωτοβιοαντιδραστήρας
PV	Παρούσα αξία
RPM	Στροφές ανά λεπτό
SP	Κοχλιόπρεσα / κοχλιωτός διαχωριστής
TN	Ολικό άζωτο
TP	Ολικός φώσφορος
TPC	Συνολικό κόστος παραγωγής
TS	Ολικά στερεά
VFA	Πτητικά λιπαρά οξέα
VS	Πτητικά στερεά
WC	Κεφάλαιο κίνησης

5. ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1:Συγκεντρωτικός πίνακας μεταβολικών μονοπατιών μικροφυκών 18
Πίνακας 2:Συγκεντρωτικός πίνακας εύρος θερμοκρασιών ανάπτυξη μικροφυκών (Singh & Singh, 2015). 19
Πίνακας 3: Συγκεντρωτικός πίνακας για το εύρος pH διαφόρων ειδών μικροφυκών (Dolganyuk et al., 2020). 21
Πίνακας 4: Συγκεντρωτικός πίνακας σύγκρισης ανοικτού και κλειστού συστήματος καλλιέργειας. 26
Πίνακας 5: Σύσταση της βιομάζας διαφορετικών φωτοσυνθετικών μικροοργανισμών ως προς την περιεκτικότητα σε άζωτο, φώσφορο και κάλιο (Arahou et al., 2021; Braun & Colla, 2023)..... 28
Πίνακας 6:Κύρια στάδια διεργασίας και βασικά τεχνοοικονομικά ζητήματα για την αξιολόγηση συστημάτων παραγωγής μικροφυκών 32
Πίνακας 7: Δυναμικότητα διεργασίας και βασικοί παράμετροι σχεδιασμού..... 35
Πίνακας 8: Συγκεντρωτικός πίνακας παραμέτρων του επιλεγμένου συστήματος συγκομιδής (Fasaei, Bitter, Slegers, & van Boxtel, 2018) 37
Πίνακας 9: Σχεδιαστικές παράμετροι του αντιδραστήρα που επιλέγονται μετά από βιβλιογραφική ανασκόπηση. 40
Πίνακας 10: Συγκεντρωτικός πίνακας παραμέτρων ανάπτυξης μοντέλου μικροφυκών. 45
Πίνακας 11: Αποτελέσματα σχεδιασμού του αντιδραστήρα ανοιχτού τύπου για τα δύο σενάρια λειτουργίας..... 47
Πίνακας 12: Συγκεντρωτικό πίνακας αριθμητικών παραμέτρων υπολογισμού του συντελεστή μεταφοράς μάζας 49
Πίνακας 13: Περιεκτικότητα της βιομάζας και των θρεπτικών πηγών των δύο σεναρίων στα στοιχεία φωσφόρο και άζωτο..... 51
Πίνακας 14:Συγκεντρωτικός πίνακας ισοζυγίων μάζας της προεπεξεργασίας χωνεμένου υπολείμματος, όπου TN, total nitrogen, και TP, total phosphorus. 51
Πίνακας 15: Συγκεντρωτικός πίνακας παραμέτρων για το στάδιο των φίλτρων για τα δύο σενάρια 52
Πίνακας 16: Συγκεντρωτικός πίνακας ισοζυγίων μάζας φυγοκέντρου τύπου decanter..... 52
Πίνακας 17: Συγκεντρωτικός πίνακας ισοζυγίων μάζας χώρου φυσικής ξήρανσης (Agbede et al., 2020). 53
Πίνακας 18: Συγκεντρωτικός πίνακας πσρσμέτρων γισ το ολικό ισοζύγιο του θερμοκηπίου 56
Πίνακας 19: Παράμετροι που λήφθηκαν υπόψιν για τα ενεργειακά ισοζύγια του θερμοκηπίου. 58
Πίνακας 20:Γεωμετρικές παράμετροι σχεδιασμού πτερυγίου ανάδευσης βιοαντιδραστήρα..... 63
Πίνακας 21:Συγκεντρωτικά αποτελέσματα σχεδιασμού δεξαμενής αποθήκευσης χωνεμένου υπολείμματος και νερού 64
Πίνακας 22: Συγκεντρωτικός πίνακας σχεδιασμού αντλιών για τα δύο σενάρια..... 65
Πίνακας 23: Πίνακας αποτελεσμάτων σχεδιασμού φίλτρων. 66
Πίνακας 24:Σχεδιαστικές παράμετροι φυγοκέντρου τύπου decanter για την ξήρανση της βιομάζας και την προεπεξεργασία του digestate..... 67
Πίνακας 25: Συγκεντρωτικός πίνακας σχεδιασμού σταδίου φυσικής ξήρανσης..... 68
Πίνακας 26:Συγκεντρωτικός πίνακας παραμέτρων σχεδιασμού Screw press..... 69
Πίνακας 27: Μεταβολή του CEPCI κατά την πάροδο του χρόνου (Cost Indices – Towering Skills). 70
Πίνακας 28: Εξισώσεις για την κοστολόγηση αγοράς του εξοπλισμού. 71
Πίνακας 29:Ανάλυση κόστους πάγιου κεφαλαίου(FCI)..... 73

Πίνακας 30: Συγκεντρωτικός πίνακας κατανάλωσης ενέργειας του εξοπλισμού για τα δύο σενάρια 74
Πίνακας 31:Πίνακας κοστολόγησης βοηθητικών παροχών της διεργασίας..... 75
Πίνακας 32: Άμεση εργασία ανάλογα την μονάδα εξοπλισμού. 75
Πίνακας 33:Μισθοδοσία προσωπικού ανάλογα την θέση εργασίας 76
Πίνακας 34: Ανάλυση συνολικού κόστους παραγωγής (TPC). 77
Πίνακας 35: Τιμή προϊόντων στην αγορά. 78
Πίνακας 36: Πίνακας επιλογών κατάλληλων παραμέτρων για την αξιολόγηση του επενδυτικού πλάνου..... 79
Πίνακας 37: Πίνακας κόστους βιβλιογραφικής έρευνας για βιοδιεγερτικά λιπάσματα..... 83
Πίνακας 38: Παράμετροι και στατιστικά στοιχεία της προσαρμογής δυναμοσυνάρτησης για την εκτίμηση του κόστους κατασκευής ORP. 86
Πίνακας 39:Βιβλιογραφικά δεδομένα κοστολόγησης αγοράς αντιδραστήρα..... 86
Πίνακας 40: Παράμετροι και στατιστικά στοιχεία της προσαρμογής δυναμοσυνάρτησης για την εκτίμηση του κόστους του paddlewheel. 87
Πίνακας 41:Βιβλιογραφικά δεδομένα κόστους αγοράς πτερυγίου ανάδευσης..... 88
Πίνακας 42: Παράμετροι και στατιστικά στοιχεία της προσαρμογής δυναμοσυνάρτησης για την εκτίμηση του κόστους της κατασκευής του θερμοκηπίου. 88
Πίνακας 43:Βιβλιογραφικά δεδομένα αγοράς θερμοκηπίου. 89
Πίνακας 44: Παράμετροι και στατιστικά στοιχεία της προσαρμογής δυναμοσυνάρτησης για την εκτίμηση του κόστους της κατασκευής των φυγοκεντρικών αντλιών. 90
Πίνακας 45: Βιβλιογραφικά δεδομένα κόστους αγοράς φυγοκεντρικών αντλιών. 90
Πίνακας 46: Παράμετροι και στατιστικά στοιχεία της προσαρμογής δυναμοσυνάρτησης για την εκτίμηση του κόστους της κατασκευής του συστήματος εξαερισμού. 91
Πίνακας 47:Βιβλιογραφικά δεδομένα για την κοστολόγηση συστήματος αερισμού 92
Πίνακας 48: Παράμετροι και στατιστικά στοιχεία της προσαρμογής δυναμοσυνάρτησης για την εκτίμηση του κόστους της κατασκευής του Screw press.. 92
Πίνακας 49:Βιβλιογραφικά δεδομένα για την κοστολόγηση αγοράς Screw press..... 93

6. ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: Περιγραφή των διαφόρων τρόπων μεταβολισμού των μικροφυκών (Jareonsin & Pumas, 2021). 17
Εικόνα 2: Στάδια καμπύλης ανάπτυξης μικροφυκών (Farag & Price, 2013). 18
Εικόνα 3: Επίδραση ρυθμού ανάπτυξης μικροφυκών σε σχέση με τον παρεχόμενο φωτισμό σε 3 ζώνες: α) έλλειψη, β) κορεσμός, γ) περιορισμός (Darvehei et al., 2018). 20
Εικόνα 4:Βήματα ροής μίας δεξαμενής τύπου raceway εντός θερμοκηπίου για ανάπτυξη μικροφυκών 24
Εικόνα 5:Σχηματική απεικόνιση δεξαμενής ανοικτού τύπου open raceway pond 25
Εικόνα 6: Φωτοβιοαντιδραστήρες (α)επίπεδης πλάκας και β)κυλινδρικοί κατακόρυφοι βιοαντιδραστήρες (Abdur Razzak et al., 2024) 26
Εικόνα 7:Διάγραμμα ροής για την περίπτωση κλειστών φωτοβιοαντιδραστήρων (PBRs) (Abdur Razzak et al., 2024) 26
Εικόνα 8: Βήματα διεργασίας αναερόβιας χώνευσης (Meegoda et al., 2018). 30

7. ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Διάγραμμα 9.1: Συνολική διεργασία παραγωγής βιολιπάσματος από μικροφύκη για το Σενάριο 2. 38
Διάγραμμα 9.2: Συνολικό διάγραμμα ροής διεργασίας παραγωγής βιολιπάσματος για το Σενάριο 1..... 39
Διάγραμμα 9.3: Εποχική διαφοροποίηση της προσπίπτουσας έντασης της ακτινοβολίας Io, και της μέσης έντασης εντός της καλλιέργειας για τα δύο σενάρια, Iaverage Scenario 1 και Iaverage Scenario 2..... 42
Διάγραμμα 9.4: Μηνιαία μέση μέγιστη και ελάχιστη θερμοκρασία στην περιοχή της εγκατάστασης (Meteoblue, 2026) 43
Διάγραμμα 9.5: Εποχική διαφοροποίηση θερμοκρασίας περιβάλλοντος και θερμοκηπίου και των αδιάστατων παραμέτρων a, b. 44
Διάγραμμα 9.6: Γραφική απεικόνιση της σχετικής εποχικής μεταβολής μέγιστης, Pr_{max} και πραγματικής παραγωγικότητας, Pr_{real} για τα δύο Σενάρια 46
Διάγραμμα 9.7: Ωριαία [kg h^{-1}] και συσσωρευτική εξάτμιση νερού [kg] κατά την διάρκεια μία ημέρας του πιο ζεστού μήνα λειτουργίας για το Σενάριο 1 50
Διάγραμμα 9.8: Ωριαία και συσσωρευτική [mm h^{-1}] εξάτμιση νερού [mm] κατα την διάρκεια μίας ημέρας του πιο ζεστού μήνα λειτουργίας για το Σενάριο 1. 50
Διάγραμμα 9.9: Ωριαία θερμοκρασιακή μεταβολή της θερμοκρασίας του καλλιεργητικού μέσου και του θερμοκηπίου. 60
Διάγραμμα 9.10: Σχηματική απεικόνιση του ενεργειακού ισοζυγίου του θερμοκηπίου. 61
Διάγραμμα 9.11: Ενεργειακό ισοζύγιο και κύριες θερμικές ροές του αντιδραστήρα 62
Διάγραμμα 9.12: Υπολογισμός της περιεκτικότητας σε υγρασία της βιομάζας συναρτήσει του χρόνου ξήρανσης, σύμφωνα με το μοντέλο Wang & Signh. 68

Διάγραμμα 10.1: Μεταβολή του συνολικού κόστους πάγιου κεφαλαίου, του κόστους αγοράς εξοπλισμού, του κόστους προεπεξεργασίας, καλλιέργειας και συγκομιδής της βιομάζας συναρτήσει της δυναμικότητας της μονάδας. 80
Διάγραμμα 10.2: Ποσοστιαία κατανομή του κόστους αγοράς εξοπλισμού ανά κατηγορία για (α) το Σενάριο 1 και (β) το Σενάριο 2. 81
Διάγραμμα 10.3: Μεταβολή του μοναδιαίου κόστους παραγωγής βιομάζας και των επιμέρους συνιστωσών του συναρτήσει της δυναμικότητας της μονάδας (α) για το Σενάριο 1 (β) για το Σενάριο 2..... 82
Διάγραμμα 10.4: : Επίδραση της παραγωγικότητας και της δυναμικότητας στην τιμή ισοσκελισμού της βιομάζας για (α) το Σενάριο 1 και (β) το Σενάριο 2. 84

Διάγραμμα 12.1: Συσχέτιση του κόστους κατασκευής ανοιχτής λίμνης τύπου raceway (ORP) με την επιφάνεια και προσαρμογή δυναμοσυνάρτησης. 86
Διάγραμμα 12.2: Συσχέτιση του κόστους του paddlewheel με την επιφάνεια της λίμνης καλλιέργειας. 87
Διάγραμμα 12.3: Συσχέτιση του κόστους του θερμοκηπίου με την επιφάνεια του. 88
Διάγραμμα 12.4: Συσχέτιση του κόστους φυγοκεντρικών αντλιών για (α) χαμηλή ισχύ και (β) για υψηλή ισχύ. 89
Διάγραμμα 12.5: Συσχέτιση του κόστους του συστήματος εξαερισμού με την ογκομετρική του παροχή..... 91

Διάγραμμα 12.6: Συσχέτιση του κόστους του Screw press με την μαζική του παροχή..... 92

8. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

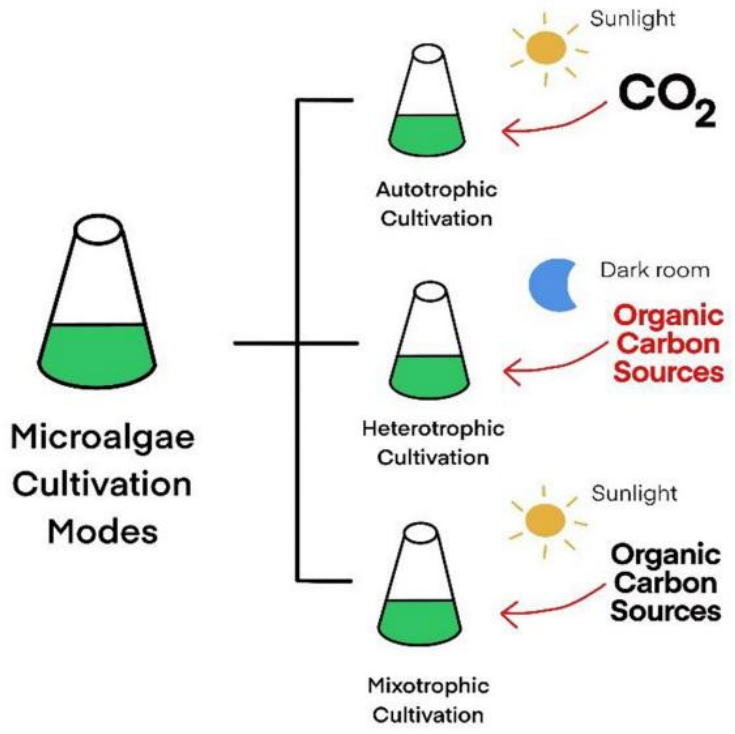
8.1 Μικροφυκη

8.1.1 Χαρακτηριστικά Μικροφυκών

Τα φύκη αποτελούν μια ευρεία ομάδα μονοκύτταρων ή πολυκύτταρων ευκαρυωτικών οργανισμών που έχουν την ικανότητα να φωτοσυνθέτουν, δεσμεύοντας το διοξείδιο του άνθρακα της ατμόσφαιρας και παράγοντας οξυγόνο. Ανάλογα με το μέγεθός τους, διακρίνονται δύο κατηγορίες: τα μακροφύκη, των οποίων το μέγεθος κυμαίνεται από μερικά εκατοστά έως και αρκετά μέτρα, και τα μικροφύκη, με διαστάσεις συνήθως της τάξης των μm. Παρότι τα κυανοβακτήρια αποτελούν προκαρυωτικούς μικροοργανισμούς και δεν κατατάσσονται ταξινομικά στα φύκη, συχνά εξετάζονται μαζί με τα μικροφύκη λόγω της φωτοσυνθετικής τους ικανότητας και των κοινών λειτουργικών χαρακτηριστικών τους (Guiry, 2012). Τα μικροφύκη ταξινομούνται σε επιμέρους ομάδες με βάση τα βιολογικά, φυσιολογικά και οικολογικά τους χαρακτηριστικά. Οι βασικότερες από αυτές είναι τα Χλωροφύκη, τα Απτόφυτα, τα Κρυπτοφύκη, τα Δινομαστιγωτά, και τα Ετεροκοντόφυτα, στα οποία περιλαμβάνονται, μεταξύ άλλων, τα Χρυσοφύκη, τα Διάτομα, τα Ευστιγματοφύκη και τα Ραφιδοφύκη (Andersen, 1992).

Τα μικροφύκη αποτελούν μια μεγάλη και ιδιαίτερα ποικιλόμορφη ομάδα φωτοσυνθετικών μικροοργανισμών, οι οποίοι απαντώνται σε χερσαία αλλά, κυρίως, σε υδάτινα οικοσυστήματα, όπου διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στα υδάτινα τροφικά πλέγματα ως πρωτογενείς παραγωγοί. Η καλλιέργεια τους προσφέρει μια ανανεώσιμη πηγή καυσίμων, τροφίμων, ζωοτροφών και υδατοκαλλιεργειών (H. Zhang et al., 2025). Η αποτελεσματική καλλιέργεια του εκάστοτε στελέχους προϋποθέτει την γνώση των ιδιαίτερων βιολογικών του χαρακτηριστικών, καθώς και τον κατάλληλο έλεγχο των συνθηκών καλλιέργειας. Στους σημαντικότερους παράγοντες περιλαμβάνονται η θερμοκρασία, το pH, η διαθεσιμότητα θρεπτικών συστατικών, κυρίως αζώτου και φωσφόρου, καθώς και οι συνθήκες ανάδευσης και αερισμού (Hossain & Mahlia, 2019).

Τα μικροφύκη μπορούν να εμφανίζουν διαφορετικούς τρόπους μεταβολισμού ανάλογα με την πηγή ενέργειας και άνθρακα που αξιοποιούν (Εικόνα 1). Κατά την αυτότροφη ανάπτυξη, χρησιμοποιούν το φως ως πηγή ενέργειας και ανόργανο άνθρακα, κυρίως υπό την μορφή CO_2. Αντίθετα, κατά την ετερότροφη ανάπτυξη, η ενέργεια και ο άνθρακας προέρχονται από οργανικές ενώσεις, χωρίς να απαιτείται φωτισμός. Τέλος, κατά τη μιξότροφη ανάπτυξη, τα μικροφύκη μπορούν να αξιοποιούν ταυτόχρονα το φως και οργανικές ενώσεις ως πηγές ενέργειας και άνθρακα, συνδυάζοντας χαρακτηριστικά της αυτότροφης και της ετερότροφης ανάπτυξης (Liang et al., 2023).



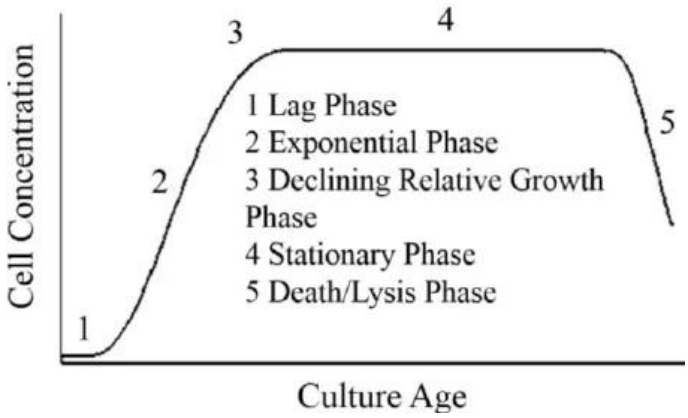
Εικόνα 1: Περιγραφή των διαφόρων τρόπων μεταβολισμού των μικροφυκών (Jareonsin & Pumas, 2021).

8.1.2 Κυτταρική ανάπτυξη μικροφυκών

Η ανάπτυξη των μικροφυκών χαρακτηρίζεται συνήθως από μια τυπική καμπύλη ανάπτυξης, η οποία διακρίνεται σε πέντε διαδοχικές φάσεις. Η κατανόηση των επιμέρους φάσεων είναι ιδιαίτερα σημαντική για τον σχεδιασμό και τη βελτιστοποίηση των καλλιεργητικών διαδικασιών (Azmi et al., 2018).

Αρχικά παρατηρείται η λανθάνουσα φάση, κατά την οποία τα κύτταρα εξοικειώνονται στις νέες περιβαλλοντικές συνθήκες του καλλιεργητικού μέσου. Κατά την φάση αυτή δεν παρατηρείται σημαντική αύξηση της βιομάζας, καθώς τα κύτταρα προσαρμόζουν την μεταβολική τους δραστηριότητα και συνθέτουν τα απαραίτητα ένζυμα για την επακόλουθη ανάπτυξή τους. Στη συνέχεια ακολουθεί η εκθετική ή λογαριθμική φάση ανάπτυξης, όπου τα μικροφύκη παρουσιάζουν υψηλό ρυθμό φωτοσύνθεσης και έντονη κυτταρική διαίρεση, καθώς οι συνθήκες καλλιέργειας και η διαθεσιμότητα των θρεπτικών παραμένουν ευνοϊκές (Farag & Price, 2013) .

Με το πέρας του χρόνου καλλιέργειας, ο ρυθμός ανάπτυξης αρχίζει να μειώνεται και ακολουθεί η φάση επιβράδυνσης, λόγω της σταδιακής εξάντλησης των θρεπτικών στοιχείων ή ακόμα και της συσσώρευσης μεταβολικών προϊόντων στο καλλιεργητικό μέσο (Lee et al., 2015). Στη συνέχεια ακολουθεί η στάσιμη φάση, όπου ο ρυθμός ανάπτυξης εξισώνεται με τον ρυθμό θανάτου των κυττάρων και ο συνολικός αριθμός παραμένει σχετικά σταθερός. Κατά τη διάρκεια αυτής της φάσης συχνά παρατηρείται συσσώρευση ενώσεων, όπως λιπίδια ή υδατάνθρακες, οι οποίες λειτουργούν ως αποθήκες ενέργειας, ενώ παρουσιάζουν ιδιαίτερη σημασία για βιοτεχνολογικές εφαρμογές. Τέλος, όταν τα θρεπτικά στοιχεία εξαντληθούν πλήρως και οι συνθήκες του περιβάλλοντος γίνουν δυσμενείς, η καλλιέργεια εισέρχεται στη φάση θανάτου, όπου ο αριθμός των ζωντανών κυττάρων μειώνεται σταδιακά, λόγω της αυξημένης κυτταρικής θνησιμότητας (Εικόνα 2).



Εικόνα 2: Στάδια καμπύλης ανάπτυξης μικροφυκών (Farag & Price, 2013).

8.1.3 Μεταβολικά μονοπάτια καλλιέργειας μικροφυκών

Τα μικροφύκη μπορούν να καλλιεργηθούν αυτότροφα, ετερότροφα, φωτοετερότροφα και μιξότροφα (Liang et al., 2023). Πιο συγκεκριμένα, κατά την αυτότροφη ανάπτυξη χρησιμοποιούν την ενέργεια του ήλιου ή τεχνητό φωτισμό για να πραγματοποιήσουν την φωτοσύνθεση (Ruiz et al., 2022) . Δεσμεύουν την χημική ενέργεια σε βιολογικά μόρια δεσμεύοντας διοξείδιο του άνθρακα και παράγοντας οξυγόνο. Στον ετερότροφο μεταβολισμό τα μικροφύκη χρησιμοποιούν διάφορες οργανικές ενώσεις, όπως η γλυκόζη, η γλυκερίνη και το οξικό οξύ, ως πηγή άνθρακα και ενέργειας. Στην περίπτωση της μιξότροφης καλλιέργειας των μικροφυκών τα τελευταία μπορούν να λειτουργήσουν είτε ως αυτότροφα είτε ως ετερότροφα ανάλογα με τις οργανικές ενώσεις που βρίσκονται διαθέσιμες και την ηλιακή ακτινοβολία (Zhan et al., 2017) . Μπορούν να αξιοποιήσουν τόσο τον ανόργανο όσο και τον οργανικό άνθρακα ως πηγή άνθρακα και την ηλιακή ακτινοβολία ή οργανικές ενώσεις ως πηγή ενέργειας. Άξιος αναφοράς, ωστόσο, είναι και ο φωτοετεροτροφικός τρόπος καλλιέργειας ο οποίος χρησιμοποιεί τον ήλιο ως πηγή ενέργειας και διάφορες οργανικές ενώσεις ως πηγή άνθρακα.

8.1.3.1 Σύγκριση μεταβολικών μονοπατιών μικροφυκών

Συγκρίνοντας όλους τους προαναφερθείς τρόπους καλλιέργειας, αυτός με την μεγαλύτερη παραγωγικότητα βιομάζας είναι ο ετερότροφος μηχανισμός, αλλά λόγω του υψηλού κόστους συχνά αποφεύγεται. όμως, σημαντικό όφελος της ετερότροφης ανάπτυξης είναι ότι ο ρυθμός ανάπτυξης του μικροφύκους, η τριφωσφορική αδενοσίνη (ATP) που παράγεται από την παρεχόμενη πηγή ενέργειας, ο συντελεστής απόδοσης ATP και η συγκέντρωση σε λιπίδια και άζωτο, είναι σημαντικά υψηλότερα απ’ ότι σε αυτότροφες καλλιέργειες (Perez-Garcia et al., 2011). Από την άλλη μεριά, η ετερότροφη ανάπτυξη απαιτεί την παροχή εξωτερικής οργανικής πηγής άνθρακα, γεγονός που αυξάνει το λειτουργικό κόστος και την πολυπλοκότητα της καλλιέργειας. Παράλληλα, η παρουσία οργανικού υποστρώματος ευνοεί την ανάπτυξη ανεπιθύμητων μικροοργανισμών, αυξάνοντας τον κίνδυνο επιμόλυνσης και τις απαιτήσεις για αυστηρότερο έλεγχο του συστήματος (Di Caprio et al., 2022).

Οι μιξότροφες καλλιέργειες παρουσιάζουν υψηλό ρυθμό ανάπτυξης και παραγωγής βιομάζας, καθώς οι μικροοργανισμοί αναπτύσσονται χωρίς περιορισμούς και έχουν τη δυνατότητα να εναλλάσσουν το μεταβολισμό ανάλογα με τις συνθήκες που επικρατούν στο περιβάλλον (Zhan et al., 2017) . Ωστόσο, παρά το γεγονός ότι η μιξότροφη καλλιέργεια οδηγεί σε υψηλότερες συγκεντρώσεις βιομάζας, η προσθήκη οργανικού υποστρώματος οδηγεί και στην περίπτωση αυτή σε αύξηση του κόστους (Πίνακας 1).

Πίνακας 1:Συγκεντρωτικός πίνακας μεταβολικών μονοπατιών μικροφυκών

Είδος μονοπατιού	Πηγή ενέργειας	Πηγή άνθρακα	Κόστος
Ετερότροφος	Οργανικές ενώσεις	Οργανικές ενώσεις	Μέτριο
Αυτότροφος	Φως	Ανόργανη	Χαμηλό
Μιξότροφος	Οργανικές ενώσεις/Φως	Ανόργανος/Οργανικές ενώσεις	Υψηλό
Φωτοετερότροφος	Φως	Οργανικές ενώσεις	Υψηλό

8.2 Παραγοντες που επηρεαζουν την αναπτυξη μικροφυκων

8.2.1 Θερμοκρασία

Η θερμοκρασία αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες που καθορίζουν την κατανομή, την αφθονία και τη φυσιολογική λειτουργία των κυττάρων, τόσο σε φυσικά οικοσυστήματα όσο και σε ελεγχόμενες καλλιέργειες. Επηρεάζει άμεσα το σύνολο των μεταβολικών διεργασιών, όπως τη φωτοσύνθεση την αναπνοή και τη διαίρεση των κυττάρων (Ras et al., 2013). Η κατανόηση, λοιπόν, του θερμικού εύρους αντοχής και της βέλτιστης θερμοκρασίας ανάπτυξης των υπό μελέτη μικροφυκών είναι κρίσιμη για τη βελτιστοποίηση της παραγωγής βιομάζας. Η απόκριση των μικροφυκών στη θερμοκρασία περιγράφεται συνήθως μέσω τριών θεμελιωδών παραμέτρων. Το πρώτο είναι η ελάχιστη θερμοκρασία (T_{min}), κάτω από την οποία η ανάπτυξη παύει. Σε αυτές τις συνθήκες, η κυτταρική μεμβράνη χάνει τη ρευστότητά της και οι ενζυμικές αντιδράσεις επιβραδύνονται δραματικά. Το δεύτερο είναι η βέλτιστη θερμοκρασία (T_{opt}), το θερμοκρασιακό εύρος εντός του οποίου παρατηρείται ο μέγιστος ρυθμός ανάπτυξης, καθώς οι μεταβολικές διεργασίες λειτουργούν με τη μέγιστη αποδοτικότητα (Rossi et al., 2023). Το τρίτο είναι η μέγιστη θερμοκρασία (T_{max}) πάνω από την οποία η ανάπτυξη καθίσταται αδύνατη, λόγω μετουσίωσης πρωτεϊνών, απενεργοποίησης βασικών ενζύμων και κατάρρευσης των κυτταρικών μεμβρανών. Η βέλτιστη θερμοκρασία ανάπτυξης δεν είναι σταθερή για όλα τα μικροφύκη. Ποικίλλει σημαντικά ανάλογα με το είδος, το στέλεχος και το φυσικό τους περιβάλλον. Τα περισσότερα κοινώς καλλιεργούμενα είδη, όπως Chlorella vulgaris, Spirulina platensis, Chlamydomonas reinhardtii και Scenedesmus, παρουσιάζουν άριστη ανάπτυξη, γεγονός που τα καθιστά ιδανικά για καλλιέργεια σε εύκρατα κλίματα (Πίνακας 2) (Singh & Singh, 2015).

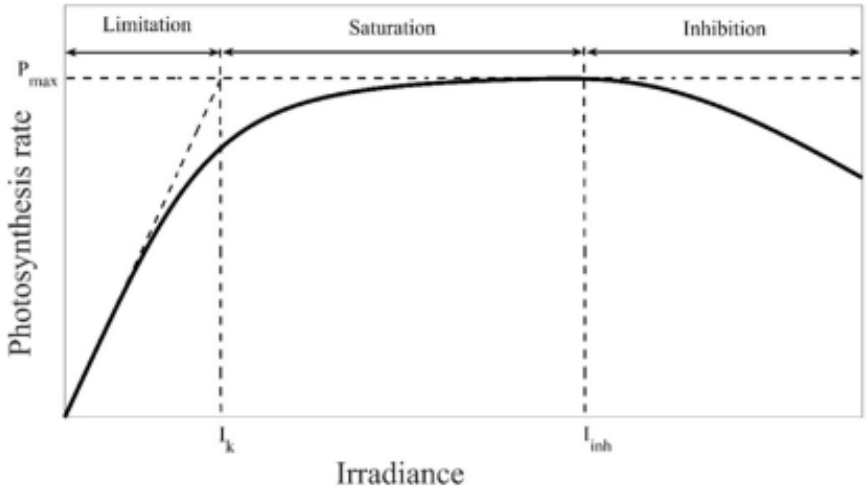
Πίνακας 2:Συγκεντρωτικός πίνακας εύρος θερμοκρασιών ανάπτυξη μικροφυκών (Singh & Singh, 2015).

Είδος	Εύρος θερμοκρασιών ανάπτυξης(°C)
Scenedesmus	10-40
Chlorella vulgaris	10-40
Spirulina	20-40
Chlorella minutissima	10-35

8.2.2 Φωτισμός

Ο φωτισμός αποτελεί τον πρωταρχικό ενεργειακό πόρο για τα φωτοσυνθετικά μικροφύκη και θεωρείται ένας από τους σημαντικότερους περιβαλλοντικούς παράγοντες που καθορίζουν την ανάπτυξη και την παραγωγικότητά τους (Maltsev et al., 2021). Το φως επηρεάζει τα μικροφύκη μέσω τριών θεμελιωδών παραμέτρων: της έντασης, της ποιότητας και της φωτοπεριόδου. Η κατανόηση της επίδρασης κάθε παραμέτρου είναι κρίσιμη για τη βελτιστοποίηση της καλλιέργειας σε φωτοβιοαντιδραστήρες και την επίτευξη υψηλής παραγωγικότητας βιομάζας.

Στα διάφορα είδη μικροφυκών υπάρχουν διαφορετικές χρωστικές ουσίες με διαφορετικές αναλογίες, συνεπώς θα χρησιμοποιούν διαφορετικά μήκη κύματος. Το εύρος του φάσματος που μπορούν να αξιοποιήσουν τα μικροφύκη για την ανάπτυξη τους κυμαίνεται από 400 έως 700 nm (Kim et al., 2013). Γενικά, η παραγωγικότητα της βιομάζας και ο ρυθμός ανάπτυξης αυξάνονται με την αύξηση της έντασης του φωτός μέχρι ένα όριο. Περαιτέρω αύξηση της έντασης του φωτός, πέρα του επιτρεπόμενου ορίου, οδηγεί σε μείωση του ρυθμού ανάπτυξης της καλλιέργειας εξαιτίας της φωτοοξείδωσης που προκαλείται στα κύτταρα (Εικόνα 3).



Εικόνα 3: Επίδραση ρυθμού ανάπτυξης μικροφυκών σε σχέση με τον παρεχόμενο φωτισμό σε 3 ζώνες: α) έλλειψη, β) κορεσμός, γ) περιορισμός (Darvehei et al., 2018).

Ανάλογα με το είδος των μικροφυκών ο ρυθμός ανάπτυξης διαφέρει, όμως τις περισσότερες φορές κυμαίνεται από $200 - 400\ \mu E\ m^{-2}\ s^{-1}$. Για ανοικτά συστήματα καλλιέργειας ως πηγή φωτός χρησιμοποιείται το ηλιακό φως, ενώ σε κλειστούς φωτοαντιδραστήρες χρησιμοποιούνται συνήθως οπτικές ίνες και τεχνητές πηγές φωτός όπως είναι οι δίοδοι φωτοεκμπομπής (LED) (Heining & Buchholz, 2015) . Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνονται ελεγχόμενες και σταθερές συνθήκες φωτισμού με αποτέλεσμα την παραγωγή υψηλής αξίας προϊόντων με σταθερή ποιότητα. Οι νέες τεχνολογίες λαμπτήρων (οπτικές ίνες, LED) υπόσχονται βελτιστοποίηση στην καλλιέργεια των μικροφυκών καθώς παρέχουν υψηλή απόδοση και μικρή κατανάλωση ενέργειας (Wang et al., 2014) .

8.2.3 pH

Η συγκέντρωση ιόντων υδρογόνου (pH) αποτελεί θεμελιώδη υδροχημική παράμετρο που καθορίζει τον επιτυχή εγκλιματισμό και την ανάπτυξη των μικροφυκών, τόσο σε φυσικά οικοσυστήματα όσο και σε ελεγχόμενες καλλιέργειες. Η επίδραση του pH δεν είναι μονοδιάστατη, αλλά εκδηλώνεται μέσω ενός πλέγματος αλληλένδετων βιοχημικών και φυσικοχημικών διεργασιών, οι οποίες επηρεάζουν τη συνολική παραγωγικότητα της βιομάζας. Καταρχάς, το pH καθορίζει την διαθεσιμότητα και τη χημική μορφή των ανόργανων θρεπτικών συστατικών στο μέσο καλλιέργειας (Juneja et al., 2013). Για παράδειγμα, η διαλυτότητα και η βιοδιαθεσιμότητα του διοξειδίου του άνθρακα, της πηγής άνθρακα για τη φωτοσύνθεση, εξαρτάται άμεσα από το pH, επηρεάζοντας την ισορροπία μεταξύ CO_2, διττανθρακικών (HCO_3^-) και ανθρακικών (CO_3^{2-}) ιόντων. Παράλληλα, η δέσμευση μετάλλων και ιχνοστοιχείων, απαραίτητων για τη λειτουργία ενζύμων, μπορεί να καταστεί περιοριστικός παράγοντας

σε μη βέλτιστες τιμές pH. Η βιομάζα που παράγεται υπό αυτές τις συνθήκες είναι σημαντικά μειωμένη καθ' όλη τη διάρκεια της καλλιέργειας, γεγονός που υποδηλώνει διαταραχή της ομοιόστασης και πιθανή δυσλειτουργία των ενζυμικών συστημάτων που εμπλέκονται στη φωτοσύνθεση και στην πρόσληψη θρεπτικών συστατικών (Πίνακας 3). Αντιθέτως, στο ουδέτερο προς ήπια αλκαλικό εύρος, η ανάπτυξη είναι εμφανώς ενισχυμένη (Qiu et al., 2017).

Πίνακας 3: Συγκεντρωτικός πίνακας για το εύρος pH διαφόρων ειδών μικροφυκών (Dolganyuk et al., 2020).

Μικροοργανισμός	Παραγωγή βιομάζας $\left(\frac{g}{L}\right)$		
	pH=4	pH=6	pH=8
Chlorella vulgaris	0.75	0.67	0.34
Scenedesmus obliquus	0.18	0.65	0.69
Neochloris cohaerens	0.21	0.73	0.68
Haematococcus pluvialis	0.16	0.69	0.67
Nannochloropsis gaditana	0.18	0.78	0.76

Η άμεση συσχέτιση μεταξύ της αύξησης του pH και της φωτοσυνθετικής δραστηριότητας έχει αναφερθεί σε μελέτες που παρακολουθούν την παράλληλη εξέλιξη της οπτικής πυκνότητας (OD) και της τιμής του pH στις καλλιέργειες (Jia et al., 2015). Η κατανάλωση CO_2 κατά τη φωτοσύνθεση οδηγεί σε μετατόπιση της χημικής ισορροπίας του ανθρακικού συστήματος και, κατά συνέπεια, σε αύξηση του pH, καθιστώντας το μέσο περισσότερο αλκαλικό. Αυτή η αυτοεπαγόμενη μεταβολή μπορεί να δημιουργήσει συνθήκες στρες, περιορίζοντας την περαιτέρω ανάπτυξη, εάν δεν υπάρχει ρυθμιστική ικανότητα στο σύστημα (Austin & Biotechnol Bioeng, 2021). Η δυναμική αυτή σχέση επιτρέπει μάλιστα τη χρήση του ρυθμού μεταβολής του pH ως δείκτη για την εκτίμηση της φωτοσυνθετικής απόδοσης και του ρυθμού δέσμευσης άνθρακα σε πραγματικό χρόνο. Η ύπαρξη ενός ειδικού βέλτιστου εύρους pH είναι κρίσιμη για τη μεγιστοποίηση της απόδοσης. Πειραματικές δοκιμές καταδεικνύουν ότι η μεταβολή του pH εκτός του επιθυμητού εύρους επιφέρει μείωση του ειδικού ρυθμού ανάπτυξης.

Συμπερασματικά, το pH αναδεικνύεται όχι απλώς ως μία περιβαλλοντική συνθήκη, αλλά ως ένας δυναμικός ρυθμιστικός παράγοντας (Juneja et al., 2013). Η συνεχής παρακολούθηση και η ενεργός ρύθμισή του, συνήθως μέσω ελεγχόμενης παροχής CO_2, αποτελεί ακρογωνιαίο λίθο για τη βελτιστοποίηση της ανάπτυξης και της παραγωγικής διαδικασίας σε καλλιέργειες μικροφυκών.

8.2.4 Θρεπτικά συστατικά

Για να μπορέσει να υπάρξει δυνατότητα πολλαπλασιασμού του εκάστοτε μικροφύκους και να λάβουν χώρα οι απαραίτητες μεταβολικές διεργασίες απαιτούνται θρεπτικά συστατικά. Τα κυριότερα από αυτά τα θρεπτικά συστατικά είναι ο άνθρακας(C), το άζωτο(N), και ο φώσφορος(P).

Ο άνθρακας αποτελεί το ποσοστιαία επικρατέστερο στοιχείο στην κυτταρική σύσταση των μικροφυκών, αντιπροσωπεύοντας περίπου το 50% του ξηρού βάρους των κυττάρων. Η υψηλή αυτή περιεκτικότητα αναδεικνύει τον κεντρικό ρόλο του άνθρακα ως δομικού συστατικού όλων των οργανικών μορίων. Ως φωτοσυνθετικοί μικροοργανισμοί, τα μικροφύκη μετατρέπουν το φως και τον ανόργανο άνθρακα (CO_2) σε οργανικό άνθρακα μέσω της φωτοσύνθεσης (Huang et al., 2019). Η διαδικασία αυτή περιλαμβάνει δύο στάδια όπου αρχικά η ενέργεια των φωτονίων συλλαμβάνεται και μετατρέπεται σε χημική ενέργεια (ATP) και αναγωγική ισχύ (NADPH). Στην δεύτερη φάση, το ATP και το NADPH χρησιμοποιούνται για τη δέσμευση και αναγωγή του CO_2, με τελικό προϊόν τις φωσφορικές τριόζες. Κατά τη διαδικασία της φωτοσύνθεσης σε ανοικτά συστήματα, η τιμή του pH τείνει να αυξάνεται καθώς παράγονται ιόντα OH^-. Όμως, το CO_2 τα δεσμεύει για την παραγωγή HCO_3^- με αποτέλεσμα το pH να παραμένει στα επιθυμητά επίπεδα και να αποφεύγονται δυσάρεστες συνέπειες στην καλλιέργεια. Στην περίπτωση κλειστών συστημάτων όταν δεν είναι δυνατή η αξιοποίηση του CO_2 που υπάρχει στην ατμόσφαιρα, προκειμένου να εξασφαλιστεί η ανάπτυξη των μικροφυκών χρησιμοποιείται διάλυμα ανόργανου άνθρακα.

Το άζωτο αποτελεί σημαντικό στοιχείο για αρκετά μακρομόρια του κυττάρου όπως είναι το RNA, το DNA και οι πρωτεΐνες. Αντιπροσωπεύει περίπου το 7-10% της βιομάζας και μπορεί να βρίσκεται με διάφορες μορφές όπως τα νιτρικά(NO3-), τα αμμωνιακά(NH4+) και τα νιτρώδη ιόντα(NO2-) (Yaakob et al., 2021). Τα μικροφύκη μπορούν να απορροφήσουν πιο εύκολα το άζωτο όταν είναι σε αμμωνιακή μορφή λόγω του γεγονότος ότι δε χρειάζεται να καταναλώσουν ενέργεια για να το μετατρέψουν, όπως συμβαίνει στην περίπτωση των νιτρικών όπου πρώτα ανάγονται σε αμμωνιακή μορφή για να μπορέσουν τα κύτταρα να το αξιοποιήσουν (Xin et al., 2010).

Σημαντικό θρεπτικό συστατικό για την ανάπτυξη των μικροφυκών αποτελεί και ο φώσφορος χωρίς όμως να βρίσκεται σε υψηλή περιεκτικότητα στην βιομάζα. Επιτελεί καθοριστικούς βιολογικούς ρόλους όπως η συμμετοχή στη δομή του ATP και άλλων ενεργειακών ισοδυνάμων, αποτελεί δομικό συστατικό των νουκλεϊκών οξέων και είναι βασικό συστατικό των φωσφολιπιδίων των κυτταρικών μεμβρανών (Shuhaili et al., 2023). Τα μικροφύκη προσλαμβάνουν το φωσφόρο σε μορφή ορθοφωσφορικής ρίζας (PO_4^{3-}). Σε περίπτωση όμως που βρίσκεται σε οργανική μορφή, με τη βοήθεια φωσφατασών που εκκρίνουν τα μικροφύκη τον μετατρέπουν σε ορθοφωσφορικά ιόντα. Στην περίπτωση όπου ο φωσφορος βρίσκεται σε χαμηλή συγκέντρωση στο περιβάλλον, τα μικροφύκη έχουν την δυνατότητα αποθήκευσής του στο κύτταρο προκειμένου να καλυφθούν οι μετέπειτα ανάγκες τους.

8.2.5 Αερισμός και ανάδευση

Για την καλλιέργεια των μικροφυκών, καθοριστικό ρόλο διαδραματίζει και η ανάδευση. Αυτή επιτελεί διττό λειτουργικό ρόλο, καθώς συμβάλλει τόσο στην αποτελεσματικότερη κατανάλωση του υποστρώματος όσο και στην ανάπτυξης των κυττάρων της καλλιέργειας. Μέσω της κατάλληλης ανάδευσης αποτρέπεται η καθίζηση των κυττάρων,εξασφαλίζεται η ομοιόμορφη κατανομή των θρεπτικών συστατικών στο μέσο και διασφαλίζεται η βέλτιστη έκθεση των κυττάρων στο φως. Ωστόσο, προκειμένου να αποφευχθεί η κυτταρική καταπόνηση ή λύση, η ένταση της ανάδευσης δεν πρέπει να είναι υπερβολικά υψηλή. Η ομογενοποίηση της καλλιέργειας επιτυγχάνεται με τη χρήση αντλιών μαγνητικής ή μηχανικής ανάδευσης, οι οποίες εξασφαλίζουν ταυτόχρονα και την παροχή αέρα (Magdaong et al., 2019).

8.3 Συστηματα καλλιεργειας

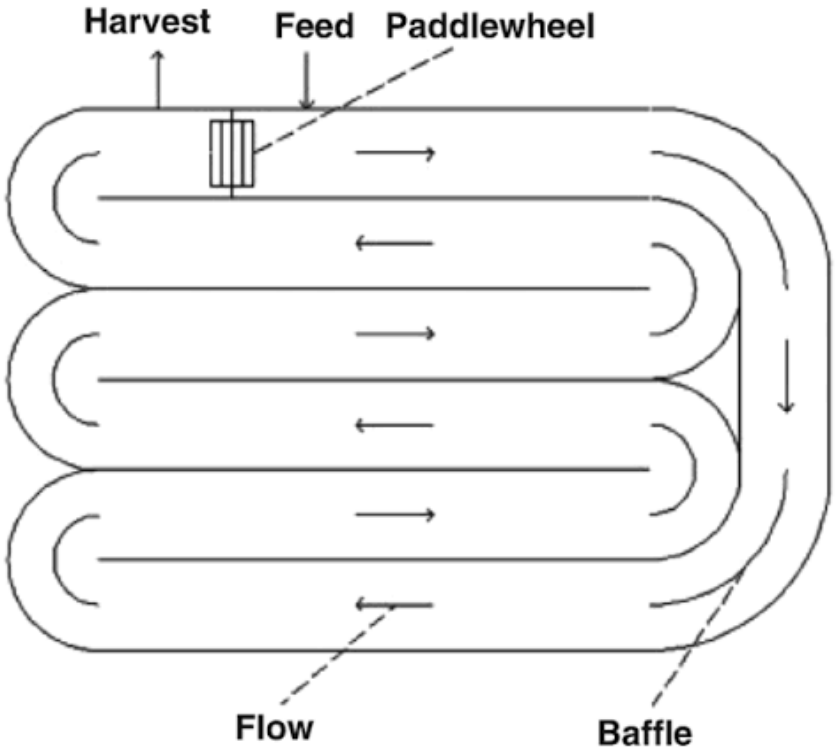
Η καλλιέργεια μικροφυκών πραγματοποιείται κυρίως σε δύο βασικούς τύπους συστημάτων. Αρχικά, τα ανοικτά συστήματα καλλιέργειας, όπως οι δεξαμενές τύπου raceway ponds (Εικόνα 4), αποτελούν απλές και οικονομικές εγκαταστάσεις όπου τα μικροφύκη αναπτύσσονται σε ρηχές δεξαμενές εκτεθειμένες στο φυσικό περιβάλλον, χρησιμοποιώντας το ηλιακό φως ως πηγή ενέργειας. Αντίθετα, τα κλειστά συστήματα καλλιέργειας, γνωστά ως φωτοβιοαντιδραστήρες (Photobioreactors, PBRs), αποτελούν ελεγχόμενα συστήματα στα οποία ρυθμίζονται με ακρίβεια παράγοντες όπως η θερμοκρασία, η ένταση φωτός, το pH και η παροχή διοξειδίου του άνθρακα.

8.3.1 Ανοικτό σύστημα

Τα ανοικτά συστήματα καλλιέργειας αποτελούν μία από τις πιο διαδεδομένες και οικονομικά αποδοτικές μεθόδους παραγωγής μικροφυκών σε μεγάλη κλίμακα. Συνήθως περιλαμβάνουν ρηχές δεξαμενές ή τεχνητές λίμνες, με πιο χαρακτηριστικό παράδειγμα τις δεξαμενές τύπου raceway ponds, (Richmond, 1992)στις οποίες το καλλιεργητικό μέσο κυκλοφορεί συνεχώς μέσω μηχανικής ανάδευσης με τη βοήθεια περιστρεφόμενων πτερυγίων (Richmond, 1992). Η ανάπτυξη των μικροφυκών στα συστήματα αυτά βασίζεται κυρίως στη χρήση του φυσικού ηλιακού φωτός ως πηγή ενέργειας για τη φωτοσύνθεση, ενώ η παροχή διοξειδίου του άνθρακα και θρεπτικών στοιχείων, όπως άζωτο και φώσφορος, συμβάλλει στη διατήρηση της παραγωγικότητας της καλλιέργειας. Τα ανοικτά συστήματα χαρακτηρίζονται από χαμηλό κόστος κατασκευής και λειτουργίας, γεγονός που τα καθιστά κατάλληλα για εφαρμογές μεγάλης κλίμακας, όπως η παραγωγή βιομάζας για βιοκαύσιμα, ζωοτροφές ή επεξεργασία λυμάτων (Brennan & Owende, 2010) . Παρόλα αυτά, παρουσιάζουν ορισμένους σημαντικούς περιορισμούς. Ο έλεγχος των περιβαλλοντικών παραμέτρων, όπως η θερμοκρασία, το pH, η ένταση φωτός και η συγκέντρωση θρεπτικών στοιχείων, είναι περιορισμένος, καθώς οι καλλιέργειες επηρεάζονται άμεσα από τις κλιματικές και περιβαλλοντικές συνθήκες. Επιπλέον, υπάρχει αυξημένος κίνδυνος επιμόλυνσης από άλλους μικροοργανισμούς, βακτήρια ή ανεπιθύμητα είδη μικροφυκών, καθώς και απώλειες νερού λόγω εξάτμισης, γεγονός που μπορεί να επηρεάσει τη σταθερότητα και την αποδοτικότητα της καλλιέργειας (Kratzer & Murkovic, 2021) .

8.3.1.1 Συστήματα εντός θερμοκηπίου

Καθώς η ολοένα και αυξανόμενη αλλαγή του κλίματος επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τους παράγοντες ανάπτυξης των μικροφυκών είναι λογικό να υπάρχει ανάγκη εύρεσης διαφορετικών τύπων ανάπτυξης. Κατά συνέπεια, οι παράγοντες αυτοί αμφισβητούν συλλογικά την αποδοτικότητα των μεθόδων καλλιέργειας μικροφυκών σε ανοιχτό χώρο, καθιστώντας απαραίτητη την καλλιέργεια μικροοργανισμών υπό προστατευμένες συνθήκες για τον μετριασμό των επιπτώσεων των εξωτερικών κλιματικών διακυμάνσεων. Μια από αυτές τις μεθόδους είναι η καλλιέργεια σε θερμοκήπια τα οποία έχουν την ευχέρεια να μειώνουν τους κινδύνους μόλυνσης από ιούς, πρωτόζωα και άλλους ανεπιθύμητους μικροοργανισμούς (Fatnassi et al., 2025). Επιπλέον, η τοποθέτηση των συστημάτων καλλιέργειας μέσα σε θερμοκήπια δημιουργεί ένα κλίμα όπου η θερμοκρασία, η υγρασία και ο όγκος του νερού μπορούν να ρυθμιστούν με ακρίβεια, κάτι που επιτρέπει την καλλιέργεια των μικροφυκών για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα κατά τη διάρκεια του έτους. Παράλληλα, η καλλιέργεια σε θερμοκήπια θωρακίζει το σύστημα από ακραία καιρικά φαινόμενα, όπως οι έντονες βροχοπτώσεις, οι οποίες διαταράσσουν τη στοιχειομετρία του μέσου και το pH. Σημαντικό θερμοδυναμικό όφελος αποτελεί, επίσης, η δραστική μείωση της εξάτμισης του νερού. Αναλυτικότερα, η συγκράτηση των υδρατμών δεν εξοικονομεί απλώς υδατικούς πόρους, αλλά αποτρέπει και την ανεξέλεγκτη αύξηση της αλατότητας (Sapounas et al., 2020) .



Εικόνα 4:Βήματα ροής μίας δεξαμενής τύπου raceway εντός θερμοκηπίου για ανάπτυξη μικροφυκών

Από την άλλη μεριά η συγκεκριμένη μέθοδος καλλιέργειας έχει και σημαντικά μειονεκτήματα, καθώς το υλικό κάλυψης εξασθενεί την διαθέσιμη ηλιακή ακτινοβολία και σε συνδυασμό με την συμπύκνωση των σταγονιδίων εντός του υλικού αυτού περιορίζεται η μέγιστη ειδική ανάπτυξη των μικροφυκών. Επιπρόσθετα, κατά τους θερινούς μήνες ελλοχεύει ο κίνδυνος σοβαρής υπερθέρμανσης, γεγονός που καθιστά επιτακτική την εγκατάσταση ενεργοβόρων συστημάτων εξαερισμού, προκειμένου να αποφευχθεί το θερμικό στρες της βιομάζας (Farvardin et al., 2024) . Οι απαιτήσεις αυτές οδηγούν αναπόφευκτα σε αύξηση του αρχικού κόστους εγκατάστασης και των λειτουργικών εξόδων, δημιουργώντας μια σύνθετη εξίσωση βιωσιμότητας για πιλοτικές και βιομηχανικές κλίμακες χαμηλού περιθωρίου κέρδους (Harjunowibowo et al., 2018) .

8.3.1.2 Σύστημα λίμνης (open raceway pond)

Οι ανοικτές δεξαμενές τύπου raceway (ORPs), που θα αναλυθούν εκτενώς, αποτελούν το πιο διαδεδομένο και οικονομικά βιώσιμο σύστημα μαζικής καλλιέργειας μικροφυκών. Πιο συγκεκριμένα, διαθέτουν οβάλ σχήμα, χαμηλό βάθος και ένα διαχωριστικό τμήμα το οποίο διαμορφώνει μια κλειστή διαδρομή συνεχούς ροής και η λειτουργία τους βασίζεται σε μηχανικό τροχό ανάδευσης που εξασφαλίζει την ήπια αλλά και συνεχή κυκλοφορία του υδάτινου μέσου, εμποδίζοντας την καθίζηση της βιομάζας (Alavianghavanini et al., 2024). Στην Εικόνα 5 φαίνεται με σαφή τρόπο η περιγραφή του συστήματος ανοικτής λίμνης.

Το μικρό βάθος των open raceway ponds ευνοεί τη διείσδυση της ηλιακής ακτινοβολίας και τη συχνή έκθεση των κυττάρων στο φως μέσω της συνεχούς κυκλοφορίας του μέσου. Παράλληλα, η απλότητα της κατασκευής και η σχετικά χαμηλή ενεργειακή απαίτηση για ανάδευση καθιστούν τα συστήματα αυτά ιδιαίτερα ελκυστικά για εφαρμογές μεγάλης κλίμακας. Ωστόσο, η ανοικτή τους διαμόρφωση συνεπάγεται μεγαλύτερη εξάρτηση από τις εξωτερικές κλιματικές συνθήκες, αυξημένο

κίνδυνο επιμόλυνσης και απώλειες νερού μέσω εξάτμισης, παράγοντες που μπορούν να περιορίσουν τη σταθερότητα της παραγωγικότητας (Skifa et al., 2025) .



Εικόνα 5:Σχηματική απεικόνιση δεξαμενής ανοικτού τύπου open raceway pond

Μία άμεση λύση σε αυτού του είδος το πρόβλημα αποτελεί η εγκατάσταση των ORPs σε ελεγχόμενα θερμοκήπια, καθώς λειτουργούν ως ένα προστατευτικό φράγμα ενάντια στις ακραίες καιρικές μεταβολές, παγιδεύοντας την ηλιακή θερμότητα κατά τους χειμερινούς μήνες διατηρώντας έτσι το περιβάλλον της καλλιέργειας στις επιθυμητές θερμοκρασίες (Abdur Razzak et al., 2024) . Επιπλέον, η εξωτερική κάλυψη του θερμοκηπίου ελαχιστοποιεί την αερομεταφερόμενη εισροή σκόνης, θηρευτών και υπολειμμάτων διασφαλίζοντας με αυτόν τον τρόπο την σταθερότητα και την καθαρότητα της καλλιέργειας. Η δυνατότητα ενσωμάτωσης τεχνητού φωτισμού (LED) εντός του θερμοκηπίου επιτρέπει τη συμπλήρωση του φυσικού φωτός κατά τις συννεφιασμένες ημέρες ή τη νύχτα, εξασφαλίζοντας μια σταθερή φωτοπερίοδο που μεγιστοποιεί την ημερήσια φωτοσυνθετική απόδοση και την παραγωγικότητα της βιομάζας

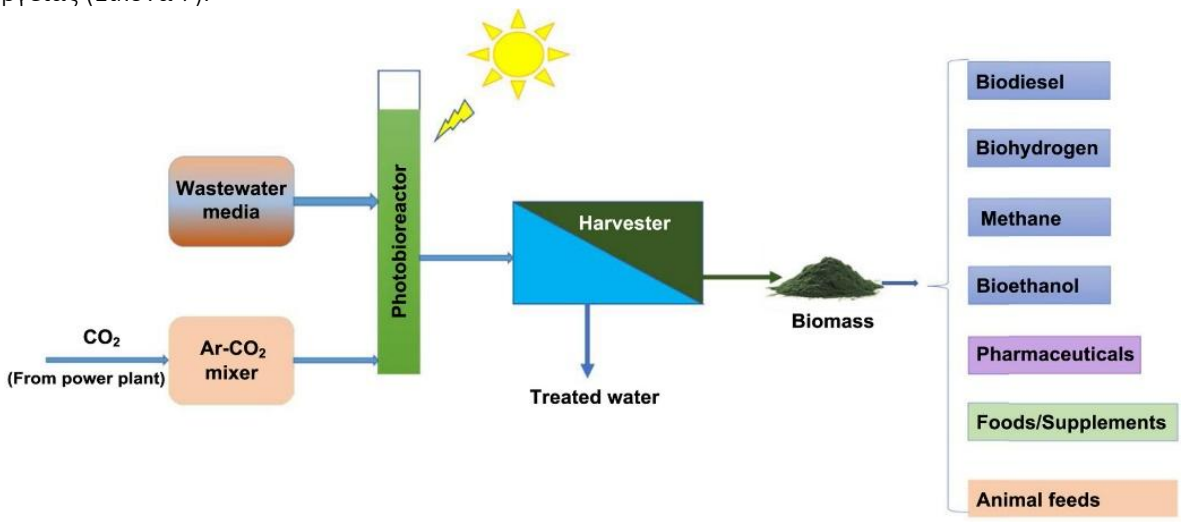
8.3.2 Κλειστό σύστημα

Τα κλειστά συστήματα καλλιέργειας αποτελούν πιο εξελιγμένες τεχνολογικά εγκαταστάσεις που επιτρέπουν την ανάπτυξη μικροφυκών υπό αυστηρά ελεγχόμενες συνθήκες. Σε αυτά τα συστήματα, η καλλιέργεια πραγματοποιείται σε κλειστούς διαφανείς αντιδραστήρες, οι οποίοι μπορεί να έχουν τη μορφή σωληνωτών, επίπεδων ή κυλινδρικών δομών (Εικόνα 6). Το καλλιεργητικό μέσο κυκλοφορεί συνεχώς στο εσωτερικό του συστήματος, ενώ παράλληλα ρυθμίζονται με ακρίβεια σημαντικοί παράγοντες ανάπτυξης, όπως η ένταση και η διάρκεια του φωτισμού, η θερμοκρασία, το pH, η συγκέντρωση διοξειδίου του άνθρακα και η παροχή θρεπτικών συστατικών (Abdur Razzak et al., 2024).



Εικόνα 6: Φωτοβιοαντιδραστήρες (α)επίπεδης πλάκας και β)κυλινδρικοί κατακόρυφοι βιοαντιδραστήρες (Abdur Razzak et al., 2024) .

Η δυνατότητα ελέγχου αυτών των παραμέτρων επιτρέπει τη δημιουργία βέλτιστων συνθηκών για την ανάπτυξη των μικροφυκών, οδηγώντας σε υψηλότερη παραγωγικότητα και καλύτερη ποιότητα βιομάζας (Q. Zhang et al., 2013). Επιπλέον, το κλειστό περιβάλλον μειώνει σημαντικά τον κίνδυνο επιμόλυνσης από εξωτερικούς μικροοργανισμούς και επιτρέπει την καλλιέργεια εξειδικευμένων ή ευαίσθητων στελεχών μικροφυκών που χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές υψηλής προστιθέμενης αξίας, όπως στη φαρμακευτική, στη βιοτεχνολογία και στη βιομηχανία τροφίμων (Πίνακας 4). Παρά τα σημαντικά πλεονεκτήματά τους, τα κλειστά συστήματα χαρακτηρίζονται από υψηλότερο κόστος εγκατάστασης, λειτουργίας και συντήρησης, ενώ απαιτούν και μεγαλύτερη τεχνολογική υποστήριξη για τη σωστή διαχείριση των καλλιεργητικών συνθηκών. Για τον λόγο αυτό, χρησιμοποιούνται κυρίως σε περιπτώσεις όπου απαιτείται υψηλή ποιότητα προϊόντος και αυξημένος έλεγχος της καλλιέργειας (Εικόνα 7).



Εικόνα 7:Διάγραμμα ροής για την περίπτωση κλειστών φωτοβιοαντιδραστήρων (PBRs) (Abdur Razzak et al., 2024) .

Πίνακας 4: Συγκεντρωτικός πίνακας σύγκρισης ανοικτού και κλειστού συστήματος καλλιέργειας.

Χαρακτηριστικό	Ανοιχτά Συστήματα	Κλειστά Συστήματα

Παραγωγικότητα	Χαμηλή	Υψηλή
Επιμόλυνση	Υψηλό ρίσκο	Χαμηλό ρίσκο
CAPEX (Κεφάλαιο)	Χαμηλό	Υψηλό
OPEX (Λειτουργικά Έξοδα)	Χαμηλό	Υψηλό
Έλεγχος Παραμέτρων	Χαμηλός	Υψηλός
Καθαρότητα/Ποιότητα	Χαμηλή	Υψηλή
Αποδοτικότητα Λήψης Φωτός	Χαμηλή	Υψηλή
Ενεργειακή Κατανάλωση	Χαμηλή	Υψηλή
Απώλεια Νερού μέσω Εξάτμισης	Υψηλή	Χαμηλή
Απαιτούμενη Έκταση Γης	Υψηλή	Χαμηλή
Scale-up (Εφαρμογή σε μεγάλη κλίμακα)	Εύκολη	Πιθανή

8.4 Παραγωγη βιολιπασματων απο μικροφυκη

Η παραγωγή βιολιπασμάτων και βιοδιεγερτών από μικροφύκη αποτελεί μία από τις πλέον υποσχόμενες προσεγγίσεις για τη μετάβαση της σύγχρονης γεωργίας προς ένα μοντέλο αειφόρου ανάπτυξης, αντιμετωπίζοντας τις αρνητικές επιπτώσεις της εντατικής χρήσης συνθετικών χημικών λιπασμάτων που οδηγούν στην υποβάθμιση του εδάφους και τον ευτροφισμό (Álvarez-González et al., 2022). Τα μικροφύκη, πέραν της παροχής απαραίτητων μακροθρεπτικών συστατικών, όπως το άζωτο και ο φώσφορος, δρουν ως ισχυροί βιοδιεγέρτες.

8.4.1 Βιολιπάσματα και βιοδιεγέρτες

Η ανάγκη περιορισμού της εξάρτησης της σύγχρονης γεωργίας από συμβατικά ανόργανα λιπάσματα έχει ενισχύσει το ενδιαφέρον για εναλλακτικά προϊόντα βιολογικής προέλευσης, μεταξύ των οποίων περιλαμβάνονται τα βιολιπάσματα και οι βιοδιεγέρτες. Παρότι οι δύο όροι συχνά χρησιμοποιούνται παράλληλα, αφορούν διαφορετικούς μηχανισμούς δράσης και είναι σημαντικό να διακρίνονται.

Τα βιολιπάσματα αποσκοπούν κυρίως στη βελτίωση της θρέψης των φυτών μέσω της αύξησης της διαθεσιμότητας απαραίτητων θρεπτικών στοιχείων. Στην περίπτωση των μικροφυκών, η πιθανή λιπασματική τους αξία σχετίζεται με την παρουσία στοιχείων όπως το άζωτο και ο φώσφορος, αλλά και οργανικής ύλης και μικροθρεπτικών συστατικών στη βιομάζα τους. Για τον λόγο αυτό, η μικροφυκική βιομάζα διερευνάται ως εναλλακτική γεωργική εισροή με δυνατότητα μερικής ή και ολικής υποκατάστασης συμβατικών λιπασμάτων και ταυτόχρονης ανακύκλωσης θρεπτικών στοιχείων (Braun & Colla, 2023). Η εφαρμογή μικροφυκών στη γεωργία μπορεί να συμβάλει στη βελτίωση της γονιμότητας του εδάφους και στην ανάπτυξη των φυτών, ενώ παράλληλα εντάσσεται σε μια περισσότερο κυκλική προσέγγιση διαχείρισης θρεπτικών πόρων. Αντίθετα, οι βιοδιεγέρτες δεν χαρακτηρίζονται πρωτίστως από την ποσότητα θρεπτικών στοιχείων που περιέχουν (Colla & Rouphael, 2020). Σύμφωνα με την βιβλιογραφία, ένα φυτικό βιοδιεγερτικό προϊόν έχει ως λειτουργία τη διέγερση των διεργασιών θρέψης του φυτού ανεξάρτητα από την περιεκτικότητά του σε θρεπτικά συστατικά, με στόχο τη βελτίωση χαρακτηριστικών όπως η αποδοτικότητα χρήσης θρεπτικών, η ανοχή σε αβιοτικές καταπονήσεις, τα ποιοτικά χαρακτηριστικά της καλλιέργειας ή η διαθεσιμότητα θρεπτικών στοιχείων στο έδαφος. Η μικροφυκική βιομάζα και τα παράγωγά της παρουσιάζουν ενδιαφέρον και από αυτή την άποψη, καθώς περιέχουν ποικιλία βιοδραστικών ενώσεων, όπως αμινοξέα, πολυσακχαρίτες και

ενώσεις με φυτορμονική δράση. Η παρουσία αυτών των συστατικών έχει συνδεθεί στη βιβλιογραφία με επιδράσεις στην ανάπτυξη του ριζικού συστήματος, στην πρόσληψη θρεπτικών στοιχείων, στην παραγωγικότητα και στην απόκριση των φυτών σε περιβαλλοντικές καταπονήσεις. Ωστόσο, η έκταση της βιοδιεγερτικής δράσης εξαρτάται από το είδος του μικροφύκους, τις συνθήκες καλλιέργειας, τη μορφή του τελικού προϊόντος και τη δοσολογία εφαρμογής (Parmar et al., 2023).

Επομένως, η βιομάζα μπορεί να παρουσιάζει τόσο λιπασματική όσο και βιοδιεγερτική αξία, χωρίς όμως οι δύο έννοιες να ταυτίζονται. Η λιπαντική λειτουργία σχετίζεται κυρίως με την παροχή και ανακύκλωση θρεπτικών στοιχείων, ενώ η βιοδιεγερτική λειτουργία αφορά την επίδραση βιοδραστικών συστατικών στις φυσιολογικές και θρεπτικές διεργασίες του φυτού. Η διάκριση αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική κατά την αξιολόγηση προϊόντων μικροφυκικής προέλευσης, καθώς η τελική τους λειτουργία εξαρτάται από τη χημική τους σύσταση, την επεξεργασία που έχει προηγηθεί και τον τρόπο γεωργικής εφαρμογής (Gonçalves et al., 2023).

8.4.2 Σύσταση βιολιπασμάτων και γεωργική αξία

Η δυνατότητα αξιοποίησης της βιομάζας από μικροφύκη ως γεωργική εισροή σχετίζεται άμεσα με τη χημική της σύσταση. Κατά την ανάπτυξή τους, τα μικροφύκη προσλαμβάνουν θρεπτικά στοιχεία από το καλλιεργητικό μέσο και τα ενσωματώνουν στη βιομάζα τους. Μεταξύ των σημαντικότερων στοιχείων περιλαμβάνονται το άζωτο και ο φώσφορος, ενώ ανάλογα με το είδος του μικροφύκους και τις συνθήκες καλλιέργειας μπορεί να περιέχονται επίσης κάλιο, ασβέστιο, μαγνήσιο και διάφορα ιχνοστοιχεία. Παράλληλα, σημαντικό μέρος της ξηρής βιομάζας αποτελείται από οργανική ύλη, όπως πρωτεΐνες, υδατάνθρακες και λιπίδια. Η ακριβής σύσταση εξαρτάται έντονα από το είδος, το στάδιο ανάπτυξης και κυρίως από το διαθέσιμο καλλιεργητικό μέσο. Η παρατήρηση αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική όταν χρησιμοποιούνται ρεύματα αποβλήτων, καθώς μέρος του αζώτου και του φωσφόρου του αρχικού ρεύματος μπορεί να ανακτηθεί μέσω της ανάπτυξης των μικροφυκών και να ενσωματωθεί στην παραγόμενη βιομάζα (Πίνακας 5) . Με τον τρόπο αυτό, η χρήση της μικροφυκικής βιομάζας ως βιολιπάσματος μπορεί να αποτελέσει μηχανισμό ανακύκλωσης θρεπτικών στοιχείων και όχι απλώς παραγωγής μιας νέας γεωργικής εισροής.

Πίνακας 5: Σύσταση της βιομάζας διαφορετικών φωτοσυνθετικών μικροοργανισμών ως προς την περιεκτικότητα σε άζωτο, φώσφορο και κάλιο (Arahou et al., 2021; Braun & Colla, 2023).

Συστατικό	*Chlorella* sp.	*Scenedesmus* sp.	*Arthrospira platensis*
Άζωτο (N%)	3.49	7.6	10.9
Φώσφορος (P%)	2.1	1.6	0.94
Κάλιο (K%)	0.5	0.9	1.1

8.4.3 Μηχανισμοί δράσης βιολιπασμάτων και επίδραση στην ανάπτυξη

Η επίδραση των προϊόντων που προέρχονται από μικροφύκη στην ανάπτυξη των φυτών δεν αποδίδεται σε έναν μοναδικό μηχανισμό. Αντίθετα, μπορεί να προκύπτει από τη συνδυασμένη δράση μιας θρεπτικής επίδρασης, η οποία σχετίζεται με την παροχή απαραίτητων για την ανάπτυξη θρεπτικών στοιχείων, και μιας βιοδιεγερτικής δράσης, η οποία συνδέεται με την παρουσία οργανικών και βιοδραστικών ενώσεων (Parmar et al., 2023) .

Στην πρώτη περίπτωση, το άζωτο, ο φώσφορος, το κάλιο και τα υπόλοιπα στοιχεία που περιέχονται στη βιομάζα μπορούν, μετά την εφαρμογή και τη σταδιακή αποδόμησή της, να καταστούν διαθέσιμα στο φυτό. Η οργανική ύλη που συνοδεύει τα στοιχεία αυτά μπορεί παράλληλα να επηρεάσει

τις ιδιότητες του εδάφους και τη διαθεσιμότητα των θρεπτικών. Για τον λόγο αυτό, η βιομάζα έχει διερευνηθεί και ως μερικό υποκατάστατο συμβατικών λιπασμάτων σε καλλιέργειες εδάφους και υδροπονικά συστήματα (Shi et al., 2023) .

Η παραγόμενη βιομάζα μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε νωπή, συμπυκνωμένη ή αποξηραμένη μορφή. Στην περίπτωση αυτή διατηρείται το μεγαλύτερο μέρος του κυτταρικού υλικού, συμπεριλαμβανομένων των οργανικών ενώσεων και των θρεπτικών στοιχείων που έχουν ενσωματωθεί κατά την ανάπτυξη των μικροφυκών. Η μορφή αυτή παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον όταν ο κύριος στόχος είναι η αξιοποίηση της βιομάζας ως φορέα αζώτου, φωσφόρου και οργανικής ύλης. Η χρήση ολόκληρης της βιομάζας ως γεωργικού προϊόντος έχει εξεταστεί τόσο σε συμβατικά καλλιεργητικά συστήματα όσο και σε συστήματα όπου η βιομάζα είχε παραχθεί μέσω αποβλήτων. Εναλλακτικά, η βιομάζα μπορεί να υποστεί κυτταρική διάρρηξη ή εκχύλιση, με σκοπό την απελευθέρωση διαλυτών οργανικών και βιοδραστικών ενώσεων. Τα εκχυλίσματα μικροφυκών χρησιμοποιούνται κυρίως ως βιοδιεγερτικά και όχι αποκλειστικά ως πηγή μακροθρεπτικών στοιχείων (Moon et al., 2024) .

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει επίσης το υγρό υπερκείμενο της μικροφυκικής καλλιέργειας όπου η θετική επίδραση στη βλάστηση δεν περιορίζεται αποκλειστικά στο κυτταρικό κλάσμα, γεγονός που υποδεικνύει ότι και εξωκυτταρικές ενώσεις μπορεί να συμμετέχουν στη βιοδιεγερτική δράση. Εκτός από τη βλάστηση, έχει αναφερθεί επίδραση στην ανάπτυξη ριζών και βλαστών, καθώς και στη συνολική παραγωγή φυτικής βιομάζας. Η ανάπτυξη ισχυρότερου ριζικού συστήματος είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς μπορεί να αυξήσει την επιφάνεια επαφής με το έδαφος και να ευνοήσει την πρόσληψη νερού και θρεπτικών στοιχείων (Colla & Rouphael, 2020) .

Η επίδραση μπορεί επίσης να επεκτείνεται στη φωτοσυνθετική δραστηριότητα και στη θρεπτική κατάσταση των φυτών. Η εφαρμογή μικροφυκών έχει συσχετιστεί σε ορισμένες μελέτες με αυξημένη περιεκτικότητα σε χλωροφύλλη, βελτιωμένη πρόσληψη θρεπτικών στοιχείων και μεταβολές στη φωτοσυνθετική απόδοση. Οι επιδράσεις αυτές αποδίδονται στον συνδυασμό της θρεπτικής συνεισφοράς της βιομάζας και της παρουσίας βιοδραστικών ενώσεων, χωρίς όμως να εμφανίζονται με την ίδια ένταση σε όλα τα φυτικά είδη και όλες τις συνθήκες καλλιέργειας (Ronga et al., 2019) .

8.5 Αναερόβια χώνευση

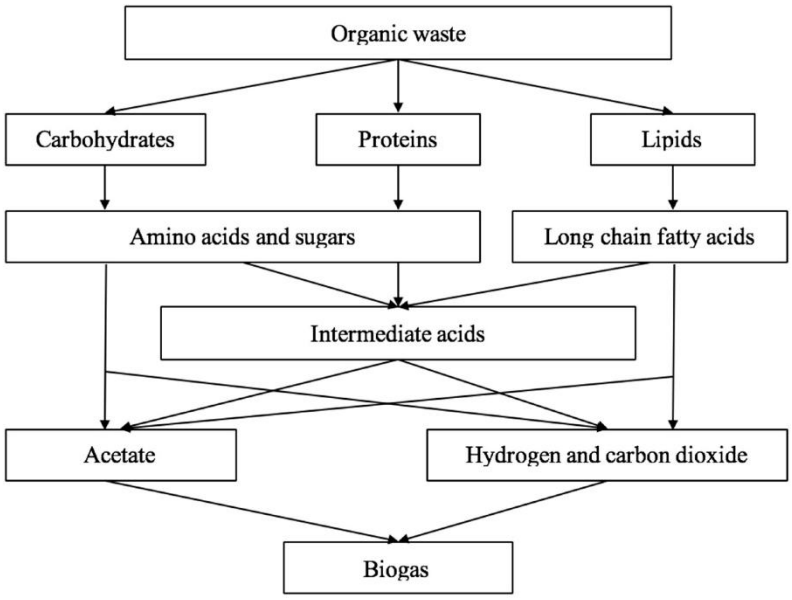
Αρχικά, θα πραγματοποιηθεί μια σύντομη ανάλυση τόσο της λειτουργίας και των επιδράσεων της διαδικασίας της αναερόβιας χώνευσης, όσο και των παραγόμενων προϊόντων της. Στη συνέχεια, θα εξεταστεί η συμβολή της στη διαμόρφωση μιας κυκλικής οικονομίας, καθώς και στη μετάβαση προς μια πιο πράσινη κοινωνία.

8.5.1 Διαδικασία αναερόβιας χώνευσης

Η αναερόβια χώνευση αποτελεί μια βιολογική διεργασία αποδόμησης οργανικής ύλης από μικροοργανισμούς σε συνθήκες απουσίας οξυγόνου. Εφαρμόζεται σε ποικίλα οργανικά υποστρώματα με κύρια προϊόντα το βιοαέριο και το χωνευμένο υπόλειμμα (digestate). Η βιολογική μετατροπή της οργανικής ύλης πραγματοποιείται μέσω διαδοχικών και αλληλεξαρτώμενων μικροβιακών διεργασιών, οι οποίες συνήθως διακρίνονται σε τέσσερα βασικά στάδια: την υδρόλυση, την οξεογένεση, την ακετογένεση και τη μεθανογένεση (Herout et al., 2011).

Κατά την υδρόλυση, μακρομόρια όπως υδατάνθρακες, πρωτεΐνες και λιπίδια, μετατρέπονται μέσω εξωκυτταρικών ενζύμων σε απλούστερες διαλυτές ενώσεις, όπως σάκχαρα, αμινοξέα και λιπαρά οξέα (Menzel et al., 2020) . Ακολουθεί η οξεογένεση, κατά την οποία τα προϊόντα της υδρόλυσης μετατρέπονται κυρίως σε πτητικά λιπαρά οξέα (VFAs), αλκοόλες, υδρογόνο και διοξείδιο του άνθρακα. Στην ακετογένεση, σημαντικό μέρος των ενδιάμεσων οργανικών ενώσεων μετατρέπεται

σε οξικό οξύ, και τέλος, κατά τη μεθανογένεση, μεθανογόνοι μικροοργανισμοί αξιοποιούν κυρίως το οξικό οξύ, οδηγώντας στον σχηματισμό μεθανίου (Εικόνα 8).



Εικόνα 8: Βήματα διεργασίας αναερόβιας χώνευσης (Meegoda et al., 2018).

Η σταθερότητα και η απόδοση της διεργασίας εξαρτώνται από τη διατήρηση ισορροπίας μεταξύ των επιμέρους μικροβιακών σταδίων. Παράγοντες όπως η σύσταση του υποστρώματος, η θερμοκρασία, το pH και ο χρόνος παραμονής επηρεάζουν τόσο τον βαθμό αποδόμησης της οργανικής ύλης όσο και την ποσότητα και σύσταση του παραγόμενου βιοαερίου. Πειραματικές μελέτες επιβεβαιώνουν, για παράδειγμα, ότι η μεταβολή της πρώτης ύλης μπορεί να επηρεάσει σημαντικά τόσο την περιεκτικότητα του βιοαερίου σε μεθάνιο όσο και τον σχηματισμό ανεπιθύμητων συστατικών, όπως το υδρόθειο (He et al., 2025) .

8.5.2 Χαρακτηριστικά προϊόντων και σύσταση αναερόβιας χώνευσης

Τα κύρια προϊόντα της αναερόβιας χώνευσης είναι το βιοαέριο και το χωνεμένο υπόλειμμα. Το βιοαέριο αποτελείται κυρίως από μεθάνιο(CH_4) και διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) ενώ σε μικρότερες ποσότητες μπορεί να περιέχει υδρόθειο (H_2S), υδρατμούς και άλλα αέρια. Η σύστασή του εξαρτάται από το είδος της πρώτης ύλης και τις συνθήκες λειτουργίας του χωνευτήρα, ενώ το μεθάνιο αποτελεί το κύριο ενεργειακά αξιοποιήσιμο συστατικό του (Herout et al., 2011).

Το χωνεμένο υπόλειμμα είναι το υλικό που παραμένει μετά την αναερόβια αποδόμηση της οργανικής ύλης και αποτελείται κυρίως από νερό, υπολειμματική οργανική ύλη, αιωρούμενα στερεά και θρεπτικά συστατικά. Η σύστασή του παρουσιάζει σημαντικές διαφοροποιήσεις ανάλογα με την αρχική πρώτη ύλη, τις συνθήκες χώνευσης και την επεξεργασία που ακολουθεί. Για τον χαρακτηρισμό του εξετάζονται συνήθως παράμετροι όπως η ξηρά ουσία, τα πτητικά στερεά, το pH, το COD, το ολικό και αμμωνιακό άζωτο, ο φώσφορος και το κάλιο (Matjuda et al., 2023).

Ιδιαίτερη σημασία παρουσιάζει η περιεκτικότητά του σε άζωτο, μεγάλο μέρος του οποίου μπορεί να βρίσκεται σε αμμωνιακή μορφή, καθώς και σε φώσφορο και κάλιο. εξετάζοντας υγρά κλάσματα από μονάδες αναερόβιας συγχώνευσης πλήρους κλίμακας, κατέγραψαν σημαντικές συγκεντρώσεις αζώτου, αμμωνιακού αζώτου και καλίου, επιβεβαιώνοντας τη δυνατότητα περαιτέρω αξιοποίησης του χωνεμένου υπολείμματος ως πηγής θρεπτικών. Μετά τον μηχανικό διαχωρισμό, το χωνεμένο

υπόλειμμα διαχωρίζεται σε στερεό και υγρό κλάσμα με διαφορετική σύσταση. Τα περισσότερο διαλυτά συστατικά, όπως το αμμωνιακό άζωτο και το κάλιο, τείνουν να παραμένουν κυρίως στο υγρό κλάσμα, ενώ σημαντικό μέρος των στερεών, της οργανικής ύλης και του φωσφόρου μπορεί να συγκεντρώνεται στο στερεό κλάσμα. Η κατανομή αυτή εξαρτάται σημαντικά από την τεχνολογία διαχωρισμού που εφαρμόζεται (Cathcart et al., 2023).

8.5.3 Αξιοποίηση προϊόντος αναερόβιας χώνευσης ως θρεπτικό μέσο

Το χωνεμένο υπόλειμμα της αναερόβιας χώνευσης παρουσιάζει ενδιαφέρον ως εναλλακτικό θρεπτικό μέσο για την καλλιέργεια μικροφυκών, λόγω της περιεκτικότητάς του σε άζωτο, φώσφορο και άλλα ανόργανα θρεπτικά συστατικά. Η αξιοποίησή του μπορεί να συνδυάσει την ανάκτηση θρεπτικών από ένα υπολειμματικό ρεύμα με την παραγωγή βιομάζας, περιορίζοντας παράλληλα την απαίτηση για συνθετικά θρεπτικά μέσα (Vadiveloo et al., 2021). Ωστόσο, η άμεση χρήση του μπορεί να περιορίζεται από την υψηλή θολότητα, τα αιωρούμενα στερεά, το οργανικό φορτίο και τις υψηλές συγκεντρώσεις αμμωνιακού αζώτου, τα οποία μπορούν να επηρεάσουν τη διείσδυση του φωτός και την ανάπτυξη των μικροφυκών. Για τον λόγο αυτό συχνά εφαρμόζονται στάδια αραίωσης, διήθησης ή άλλης προεπεξεργασίας πριν από την καλλιέργεια. Η προεπεξεργασία με διήθηση, για παράδειγμα, έχει μελετηθεί ως μέσο βελτίωσης των χαρακτηριστικών του χωνεμένου υπολείμματος πριν από την παραγωγή μικροφυκικής βιομάζας (Seelam et al., 2022). Η προσέγγιση αυτή παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον στο πλαίσιο της κυκλικής οικονομίας, καθώς θρεπτικά συστατικά που διαφορετικά θα παρέμεναν σε ένα υπολειμματικό ρεύμα ανακτώνται και ενσωματώνονται σε νέα βιομάζα, η οποία μπορεί στη συνέχεια να αξιοποιηθεί σε προϊόντα προστιθέμενης αξίας.

8.6 Τεχνοοικονομικη αποτιμηση βιολογικων διεργασιων

Η Τεχνοοικονομική Αποτίμηση αποτελεί ένα θεμελιώδες μεθοδολογικό εργαλείο στη μηχανική βιοδιεργασιών, το οποίο συνενώνει τον αυστηρό βιοτεχνολογικό σχεδιασμό με τη χρηματοοικονομική ανάλυση (Zimmermann et al., 2020). Κύριος σκοπός της είναι η εκτίμηση της εμπορικής βιωσιμότητας βιολογικών συστημάτων παραγωγής, διευκολύνοντας την ομαλή μετάβαση από τα κινητικά δεδομένα της εργαστηριακής κλίμακας, στη βιομηχανική κλίμακα των βιοαντιδραστήρων και των ανοιχτών συστημάτων καλλιέργειας. Μέσω της ανάλυσης αυτής, διασφαλίζεται ότι οι προτεινόμενες λύσεις δεν είναι απλώς βιολογικά εφικτές, αλλά παραμένουν οικονομικά αποδοτικές σε ένα ανταγωνιστικό περιβάλλον αγοράς.

Αρχικά, το τεχνικό σκέλος απαιτεί την ενσωμάτωση μαθηματικών μοντέλων κυτταρικής ανάπτυξης με τα ισοζύγια μάζας και ενέργειας (Fasaei, Bitter, Slegers, & van Boxtel, 2018). Με βάση αυτά τα βιοκινητικά δεδομένα, προκύπτει η ακριβής διαστασιολόγηση του εξοπλισμού της συνολικής διεργασίας. Επί αυτής της τεχνικής βάσης δομείται η οικονομική μοντελοποίηση, η οποία προσδιορίζει το Αρχικό Κεφάλαιο Επένδυσης και τα ετήσια Λειτουργικά Έξοδα, τα οποία στις βιοδιεργασίες καθορίζονται σε μεγάλο βαθμό από τις ενεργειακές απαιτήσεις της ανάδευσης και της μετέπειτα επεξεργασίας του προϊόντος. Η τελική αξιολόγηση πραγματοποιείται μέσω της ανάλυσης προεξοφλημένων ταμειακών ροών, εξάγοντας κρίσιμους δείκτες κερδοφορίας για αυτού του είδους επενδυτικών σχεδίων.

8.6.1 Τεχνοοικονομική ανάλυση καλλιέργειας μικροφυκών σε ανοικτές λίμνες

Οι ανοιχτές δεξαμενές τύπου raceway θεωρούνται συνήθως ως η φθηνότερη επιλογή για την καλλιέργεια μικροφυκών μεγάλης κλίμακας, χωρίς, ωστόσο, να θεωρείται ένα απλό σύστημα καλλιέργειας. Το κύριο πλεονέκτημά τους είναι η χαμηλότερη απαίτηση κεφαλαίου σε σύγκριση με τους κλειστούς φωτοβιοαντιδραστήρες, ωστόσο η εμπορική τους βιωσιμότητα εξακολουθεί να περιορίζεται από τη χαμηλή και μεταβλητή παραγωγικότητα βιομάζας, τη μεγάλη ζήτηση σε γη και νερό, την παροχή άνθρακα, την ενέργεια ανάδευσης, καθώς και τη συγκομιδή και επεξεργασία της βιομάζας για την ανάκτηση του προϊόντος (Davis et al., 2016; Rogers et al., 2014; Williams & Laurens, 2010).

Ένα εύρημα που επαναλαμβάνεται σε όλη τη βιβλιογραφία είναι ότι η οικονομική αποδοτικότητα των συστημάτων τύπου raceway εξαρτάται από ολόκληρη την αλυσίδα της διαδικασίας και όχι μόνο από την καλλιέργεια (Rogers et al., 2014).

Τα κατάντη στάδια είναι ιδιαίτερα σημαντικά, επειδή οι ανοιχτές δεξαμενές τύπου raceway παράγουν αραιές καλλιέργειες. Πιο συγκεκριμένα, διαπιστώθηκε ότι η συγκομιδή και η αφυδάτωση αραιών καλλιεργειών σε ανοιχτές δεξαμενές κοστίζουν συνήθως περισσότερο από την ίδια την παραγωγή της βιομάζας. Το οικονομικό όφελος των ανοικτών δεξαμενών μπορεί να χαθεί γρήγορα εάν η ανάκτηση της βιομάζας απαιτεί διαχωρισμό που απαιτεί μεγάλη κατανάλωση ενέργειας ή χημικών (Fasaei, Bitter, Slegers, & Van Boxtel, 2018; Uduman et al., 2010).

Συνολικά, οι ανοιχτές δεξαμενές τύπου raceway παραμένουν η πιο εφικτή πλατφόρμα για την καλλιέργεια βασικών προϊόντων χαμηλού κόστους, ενώ οι κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν το κόστος είναι τα θρεπτικά συστατικά, η παροχή CO2, η διαχείριση του νερού, η ενέργεια ανάδευσης, η συγκομιδή και η αποστράγγιση (Davis et al., 2016; Fasaei, Bitter, Slegers, & Van Boxtel, 2018; Rogers et al., 2014; Williams & Laurens, 2010). Για αυτό, η καλύτερη τεχνοοικονομική περίπτωση εμφανίζεται σε ολοκληρωμένα συστήματα, όπως η επεξεργασία λυμάτων, η ανάκτηση θρεπτικών ουσιών, η παραγωγή βιολογικών λιπασμάτων ή τα περιβάλλοντα βιοδιυλιστηρίων πολλαπλών προϊόντων (Arashiro et al., 2018; Park et al., 2011). Στον Πίνακα 6 παρουσιάζονται τα βασικά στάδια που πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά την τεχνοοικονομική ανάλυση συστημάτων καλλιέργειας μικροφυκών σε ανοιχτές λίμνες τύπου raceway. Κάθε στάδιο της διεργασίας συνεισφέρει διαφορετικά στο συνολικό κόστος παραγωγής, είτε μέσω του αρχικού κόστους εγκατάστασης είτε μέσω των λειτουργικών απαιτήσεων σε ενέργεια, νερό, θρεπτικά και εξοπλισμό.

Πίνακας 6:Κύρια στάδια διεργασίας και βασικά τεχνοοικονομικά ζητήματα για την αξιολόγηση συστημάτων παραγωγής μικροφυκών

Τμήμα διεργασίας	Κύριος ρόλος	Κύριο τεχνοοικονομικό ζήτημα	Βιβλιογραφία
Επιλογή θέσης και κατασκευή λίμνης	Κατασκευή των καναλιών τύπου raceway και της υποστηρικτικής υποδομής	Απαιτήσεις γης, έργα πολιτικού μηχανικού και κόστος επένδυσης	(Davis et al., 2016; Rogers et al., 2014)
Παροχή και κυκλοφορία νερού	Διατήρηση του βάθους καλλιέργειας και κυκλοφορία της καλλιέργειας στο σύστημα	Υψηλές υδραυλικές απαιτήσεις και ενεργειακό κόστος ανάδευσης	(Chiaramonti et al., 2013; Rogers et al., 2014a)

Παροχή θρεπτικών	Παροχή αζώτου, φωσφόρου και ιχνοστοιχείων	Κόστος θρεπτικών, εκτός εάν χρησιμοποιούνται απόβλητα ή πλευρικά ρεύματα	(Arashiro et al., 2018; Rogers et al., 2014a; Williams & Laurens, 2010)
Παροχή CO_2	Παροχή ανόργανου άνθρακα και έλεγχος pH	Το κόστος προμήθειας CO_2 και η απόδοση μεταφοράς του αποτελούν σημαντικούς οικονομικούς παράγοντες	(Rogers et al., 2014a; Williams & Laurens, 2010)
Καλλιέργεια	Παραγωγή βιομάζας σε εξωτερικές συνθήκες	Η μεταβλητή παραγωγικότητα επηρεάζει καθοριστικά την οικονομική απόδοση των επόμενων σταδίων	(Davis et al., 2016; Rogers et al., 2014; Williams & Laurens, 2010)
Συγκομιδή	Διαχωρισμός της βιομάζας από το αραιό καλλιεργητικό υγρό	Ένα από τα βασικά σημεία συμφόρησης της διεργασίας	(Fasaei, Bitter, Slegers, & Van Boxtel, 2018)
Πύκνωση / αφυδάτωση	Αύξηση της συγκέντρωσης στερεών για χρήση ή περαιτέρω μετατροπή	Υψηλό ενεργειακό κόστος και κόστος εξοπλισμού	(Fasaei, Bitter, Slegers, & Van Boxtel, 2018)
Μετατροπή ή τελική χρήση της βιομάζας	Μετατροπή της βιομάζας σε έλαιο, καύσιμο, ζωοτροφή, λίπασμα ή βιοαέριο	Η τελική διαδρομή αξιοποίησης επηρεάζει έντονα την κερδοφορία	(Arashiro et al., 2018)
Ενσωμάτωση με υγρά απόβλητα	Συνδυασμός καλλιέργειας με επεξεργασία αποβλήτων και ανάκτηση θρεπτικών	Μπορεί να μειώσει το κόστος θρεπτικών και να αυξήσει τη συνολική αξία της διεργασίας	(Arashiro et al., 2018; Park et al., 2011)

9. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

9.1 ΒΑΣΗ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

9.1.1 Σκοπός και μεθοδολογική προσέγγιση

Η ανάπτυξη και αξιολόγηση συστημάτων παραγωγής βιομάζας από μικροφύκη απαιτεί τον συνδυασμό τεχνικού σχεδιασμού και οικονομικής ανάλυσης. Τα μικροφύκη μπορούν να αξιοποιηθούν για την παραγωγή προϊόντων προστιθέμενης αξίας, όπως βιοπλαστικά, βιοαέριο, χρωστικές και λιπίδια. Το ευρύ φάσμα πιθανών εφαρμογών τους έχει ενισχύσει σημαντικά το ερευνητικό και τεχνολογικό ενδιαφέρον για την αξιοποίησή τους. Ωστόσο, η εφαρμογή τέτοιων διεργασιών σε μεγάλη κλίμακα εξακολουθεί να αντιμετωπίζει σημαντικές τεχνικές και οικονομικές προκλήσεις, οι οποίες μπορούν να περιορίσουν την οικονομική βιωσιμότητα των αντίστοιχων μονάδων (Bhatt et al., 2022).

Στο πλαίσιο αυτό, εξετάζεται μια ολοκληρωμένη διεργασία παραγωγής βιομάζας του μικροφύκους *Chlorella vulgaris*, με στόχο την αξιοποίησή της ως προϊόντος με εδαφοβελτιωτική και βιοδιεγερτική δράση. Παράλληλα, η *C. vulgaris* έχει καλλιεργηθεί και σε ανοικτά συστήματα τύπου raceway, ακόμη και με πραγματικά ρεύματα αποβλήτων, γεγονός που υποστηρίζει τη δυνατότητα εφαρμογής της σε μεγαλύτερη κλίμακα και υπό μεταβαλλόμενες περιβαλλοντικές συνθήκες (Xie et al., 2022). Η μελέτη περιλαμβάνει δύο εναλλακτικά σενάρια τροφοδοσίας θρεπτικών συστατικών. Στο πρώτο σενάριο χρησιμοποιούνται συμβατικές ανόργανες πηγές αζώτου και φωσφόρου, με βάση πειραματικά δεδομένα που προέκυψαν στο πλαίσιο παράλληλων διπλωματικών εργασιών. Στο δεύτερο σενάριο διερευνάται η αξιοποίηση χωνεμένου υπολείμματος αναερόβιας χώνευσης ως εναλλακτικής πηγής θρεπτικών συστατικών για την καλλιέργεια του μικροφύκους, εντάσσοντας τη διεργασία σε ένα ευρύτερο πλαίσιο κυκλικής οικονομίας και αξιοποίησης αποβλήτων.

Στην περίπτωση του δεύτερου σεναρίου, η συνολική διάταξη περιλαμβάνει την προεπεξεργασία του χωνεμένου υπολείμματος για την παρασκευή του καλλιεργητικού μέσου, την καλλιέργεια του *C. vulgaris* σε ανοικτό σύστημα τύπου raceway pond εντός θερμοκηπίου, καθώς και τα διαδοχικά στάδια συγκομιδής, συμπύκνωσης και αφυδάτωσης της παραγόμενης βιομάζας. Αντίθετα, στο πρώτο σενάριο τα απαιτούμενα ανόργανα θρεπτικά συστατικά προστίθενται στην τροφοδοσία μέσω κατάλληλων διαλυμάτων.

Η ανάπτυξη του στελέχους *C. vulgaris* επιλέχθηκε να γίνει σε ανοικτό σύστημα καλλιέργειας διότι είναι οικονομικά βιωσιμότερο καθώς και λιγότερο απαιτητικό κατά την λειτουργία τους συγκριτικά με κλειστά συστήματα (Banerjee & Ramaswamy, 2019). Το χαμηλό κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας έπαιξε επίσης σημαντικό ρόλο στην επιλογή αυτού του είδους συστήματος καλλιέργειας. Η παραγωγικότητα των ανοικτών συστημάτων καλλιέργειας επηρεάζεται σημαντικά από τις περιβαλλοντικές και λειτουργικές συνθήκες και μπορεί να παρουσιάζει σημαντική χρονική μεταβλητότητα (McCartney et al., 2018). Η αρχική παραδοχή του σχεδιασμού είναι η κατασκευή της δεξαμενής τύπου raceway να τοποθετηθεί μέσα σε θερμοκήπιο. Μπορεί αυτό το γεγονός να επιβαρύνει περισσότερο την μονάδα οικονομικά, ωστόσο κατά τους ψυχρότερους μήνες, η αξιοποίηση της ηλιακής ακτινοβολίας και η συγκράτηση μέρους της θερμότητας στο εσωτερικό του θερμοκηπίου μπορούν να περιορίσουν τις έντονες θερμοκρασιακές μεταβολές και να διατηρήσουν ευνοϊκότερες συνθήκες για την ανάπτυξη των μικροφυκών (Sapounas et al., 2020). Παράλληλα, η προστατευτική κάλυψη περιορίζει την άμεση είσοδο σκόνης, εντόμων και άλλων εξωτερικών παραγόντων, μειώνοντας τον κίνδυνο επιμόλυνσης της καλλιέργειας.

Επιπλέον, η μειωμένη έκθεση στον άνεμο και στις εξωτερικές συνθήκες μπορεί να περιορίσει τις απώλειες νερού λόγω εξάτμισης και τις ανάγκες αναπλήρωσης. Έτσι, το θερμοκήπιο προστατεύει

την καλλιέργεια από έντονα καιρικά φαινόμενα, όπως οι ισχυρές βροχοπτώσεις, οι οποίες μπορούν να μεταβάλουν τον όγκο και τη σύσταση του καλλιεργητικού μέσου.

Για τον βασικό σχεδιασμό της μονάδας υιοθετείται μια αντιπροσωπευτική μέση τιμή παραγωγικότητας βιομάζας, βάσει της οποίας πραγματοποιούνται τα ισοζύγια μάζας, η διαστασιολόγηση του απαιτούμενου εξοπλισμού και η εκτίμηση των ενεργειακών απαιτήσεων και του συνολικού κόστους της διεργασίας.

Η τεχνοοικονομική αξιολόγηση πραγματοποιείται για διαδοχικά αυξανόμενες δυναμικότητες παραγωγής, με στόχο να διερευνηθεί η επίδραση της κλίμακας στο κόστος παραγωγής και να προσδιοριστεί κατά πόσο, και σε ποιο επίπεδο δυναμικότητας, η μονάδα μπορεί να επιτύχει τιμή προϊόντος συγκρίσιμη με τις αντίστοιχες τιμές της αγοράς. Δεδομένου ότι η παραγωγικότητα της βιομάζας αποτελεί μία από τις πλέον μεταβλητές και αβέβαιες παραμέτρους του σχεδιασμού, πραγματοποιείται ανάλυση ευαισθησίας ως προς την επίδρασή της στην απαιτούμενη τιμή πώλησης του τελικού προϊόντος. Με τον τρόπο αυτό, η παραγωγικότητα αξιολογείται ως κρίσιμη παράμετρος σχεδιασμού, τόσο ως προς τις απαιτήσεις διαστασιολόγησης και τη δυναμικότητα της μονάδας όσο και ως προς τη συνολική οικονομική επίδοσή της.

9.1.2 Συστήμα καλλιέργειας και δυναμικότητα

Με βάση την παραπάνω μεθοδολογική προσέγγιση, καθορίστηκαν οι βασικές παράμετροι που αποτελούν την παραγωγική βάση σχεδιασμού της υπό μελέτη εγκατάστασης (Πίνακας 7).

Η τοποθεσία της εγκατάστασης αποτελεί σημαντική σχεδιαστική παράμετρο, καθώς οι τοπικές περιβαλλοντικές και μετεωρολογικές συνθήκες μπορούν να επηρεάσουν τη λειτουργία και την απόδοση του συστήματος καλλιέργειας. Στην παρούσα εργασία, η τοποθεσία θεωρήθηκε προκαθορισμένη και επιλέχθηκε η περιοχή της Μαγούλας Αττικής, για την οποία χρησιμοποιήθηκαν αντιπροσωπευτικά δεδομένα περιβαλλοντικών συνθηκών.

Για τον σχεδιασμό υιοθετείται προκαθορισμένος ετήσιος στόχος παραγωγής ξηρής βιομάζας, τιμή που υιοθετήθηκε βάσει βιβλιογραφικών δεδομένων ως αντιπροσωπευτική τάξη μεγέθους για παραγωγή μικροφυκών σε βιομηχανική κλίμακα (Borowitzka & Vonshak, 2017). Η τιμή αυτή χρησιμοποιήθηκε ως η απαιτούμενη ετήσια δυναμικότητα της υπό μελέτη μονάδας.

Η απαιτούμενη επιφάνεια καλλιέργειας και η δυναμικότητα των επιμέρους σταδίων της διεργασίας δεν μπορούν να προσδιοριστούν αποκλειστικά από τον ετήσιο στόχο παραγωγής, καθώς εξαρτώνται από την πραγματική παραγωγικότητα της καλλιέργειας υπό τις κλιματικές συνθήκες της περιοχής εγκατάστασης. Για τον λόγο αυτό, η ενεργός περίοδος λειτουργίας και η αντιπροσωπευτική παραγωγικότητα που θα χρησιμοποιηθούν για την τελική διαστασιολόγηση προσδιορίζονται σε μεταγενέστερο στάδιο, μετά την αξιολόγηση της εποχικής μεταβολής της θερμοκρασίας και της διαθέσιμης ηλιακής ακτινοβολίας.

Πίνακας 7: Δυναμικότητα διεργασίας και βασικοί παράμετροι σχεδιασμού.

Παράμετρος	Τιμή	
Τελικό προϊόν	Ξηρή βιομάζα	
Ετήσια παραγωγή αναφοράς, Pr [kg y^{-1}]	10,000	
Σύστημα καλλιέργειας	Open Raceway Pond	
Περιβάλλον καλλιέργειας	Θερμοκήπιο	
Πηγή θρεπτικών	Σενάριο 1	Σενάριο 2
	Ανόργανες πηγές θρεπτικών συστατικών (N, P, K)	Προεπεξεργασμένο χωνεμένο υπόλειμμα

9.1.3 Επιλογή μεθόδου συγκομιδής και συμπύκνωσης

Μετά τον υπολογισμό της παροχής εξόδου από τη λίμνη καλλιέργειας, καθορίζεται το ρεύμα της καλλιέργειας που οδηγείται στο στάδιο της συγκομιδής και της αρχικής αφυδάτωσης. Το ρεύμα αυτό αποτελείται κατά κύριο λόγο από νερό, ενώ η βιομάζα βρίσκεται σε σχετικά χαμηλή συγκέντρωση, γεγονός που καθιστά αναγκαία την εφαρμογή ενός πρώτου σταδίου διαχωρισμού πριν από την περαιτέρω συμπύκνωσή της. Στόχος του σταδίου αυτού είναι η απομάκρυνση σημαντικού μέρους της υγρής φάσης και η αύξηση της συγκέντρωσης της βιομάζας, ώστε να μειωθεί η παροχή που θα οδηγηθεί στις επόμενες μονάδες της διεργασίας και οι αντίστοιχες ενεργειακές απαιτήσεις.

Ορισμένες από τις μεθόδους συγκομιδής απορρίφθηκαν εξ αρχής ως επιλογές για τον συγκεκριμένο σχεδιασμό. Αρχικά, η φυσική καθίζηση υπό την επίδραση της βαρύτητας δεν θεωρήθηκε κατάλληλη, καθώς ο απαιτούμενος χρόνος παραμονής σε δεξαμενές καθίζησης αυξάνεται σημαντικά όσο μειώνεται το μέγεθος των κυττάρων. Η Chlorella vulgaris χαρακτηρίζεται από σχετικά μικρό κυτταρικό μέγεθος, περίπου 2 έως 10 μm, γεγονός που καθιστά τη φυσική καθίζηση αργή και μη αποδοτική (Connors et al., 2023; Drexler & Yeh, 2014) . Συνεπώς η εφαρμογή της συγκεκριμένης μεθόδου θα οδηγούσε σε μεγάλους χρόνους παραμονής, αυξημένο μέγεθος δεξαμενών και πιθανώς χαμηλότερη ανάκτηση βιομάζας.

Αντίστοιχα, η χρήση κροκιδωτικών μέσων, είτε χημικής είτε βιολογικής προέλευσης, δεν προτείνεται στο πλαίσιο της παρούσας μελέτης. Η συλλεγόμενη βιομάζα προορίζεται για χρήση ως βιολίπασμα και βιοδιεγερτικό προϊόν άμεσης εφαρμογής σε φυτά, χωρίς να μεσολαβούν έντονα στάδια καθαρισμού ή απομάκρυνσης πρόσθετων ουσιών. Η παρουσία υπολειμμάτων κροκιδωτικών στη βιομάζα θα μπορούσε να επηρεάσει αρνητικά τη βιοδιεγερτική δράση του τελικού προϊόντος και, σε ορισμένες περιπτώσεις, να προκαλέσει ανεπιθύμητες επιδράσεις στην ανάπτυξη των φυτών.

Παράλληλα, η χρήση κροκιδωτικών θα μπορούσε να δημιουργήσει προβλήματα στην ανακύκλωση του υδατικού μέσου που προκύπτει από τα στάδια αφυδάτωσης. Σε ένα σύστημα ημισυνεχούς λειτουργίας, όπου μέρος του υγρού ρεύματος δύναται να επαναχρησιμοποιηθεί, η σταδιακή συσσώρευση κροκιδωτικών ενώσεων ή υπολειμμάτων τους θα μπορούσε να επηρεάσει τη σύσταση του μέσου και να αναστείλει την ανάπτυξη των μικροφυκών σε επόμενους κύκλους καλλιέργειας (Ahmad et al., 2020) . ‘Οπως αναφέρουν και οι (Fasaei, Bitter, Slegers, & van Boxtel, 2018) ο συνδυασμός διήθησης υπό πίεση και επακόλουθης φυγοκέντρισης μπορεί να αποτελέσει ιδιαίτερα αποδοτική επιλογή για τη συγκομιδή και αφυδάτωση μικροφυκών. Συγκεκριμένα, μεταξύ των 28 σεναρίων συγκομιδής που εξετάστηκαν, τόσο συνδυαστικών όσο και σεναρίων ενός σταδίου, η συγκεκριμένη διάταξη παρουσίασε την καλύτερη συνολική επίδοση, επιτυγχάνοντας το χαμηλότερο ενεργειακό και οικονομικό κόστος.

Στον παρόντα σχεδιασμό, τα φίλτρα υπό πίεση τοποθετούνται πριν από τη φυγόκεντρο, ώστε να πραγματοποιείται ένα πρώτο στάδιο συμπύκνωσης της καλλιέργειας πριν από την τελική αφυδάτωση. Η επιλογή αυτή είναι λειτουργικά ευνοϊκή, καθώς τα φίλτρα επεξεργάζονται αρχικά ένα σχετικά αραιό ρεύμα καλλιέργειας. Αντίθετα, η τροφοδοσία των φίλτρων με ήδη συμπυκνωμένο ρεύμα θα αύξανε τον κίνδυνο φραγής, τις απαιτήσεις καθαρισμού και, κατά συνέπεια, το κόστος συντήρησης.

Η φυγοκέντρηση επιλέγεται ως τελικό στάδιο διαχωρισμού, καθώς είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική για μικροφύκη μικρού κυτταρικού μεγέθους, όπως η Chlorella. Με τον τρόπο αυτό, ο συνδυασμός διήθησης υπό πίεση και φυγοκέντρησης επιτρέπει την αρχική μείωση του όγκου του ρεύματος που οδηγείται στη φυγόκεντρο, περιορίζοντας τις ενεργειακές απαιτήσεις της, ενώ παράλληλα επιτυγχάνεται υψηλότερη τελική συγκέντρωση βιομάζας (Πίνακας 8).

Πίνακας 8: Συγκεντρωτικός πίνακας παραμέτρων του επιλεγμένου συστήματος συγκομιδής (Fasaei, Bitter, Slegers, & van Boxtel, 2018) .

Μέθοδος	Μέγιστη Συγκέντρωση στερεών στην έξοδο [%]	Απόδοση ανάκτησης βιομάζας [%]	Ενεργειακή κατανάλωση [kWh m^{-3} παροχής εισόδου]
Φυγοκέντριση	10-20	95-99	0.7-1.3
Φίλτρα υπό πίεση	22-27	98	0.5-0.9

9.2 Περιγραφη της συνολικης διεργασιας

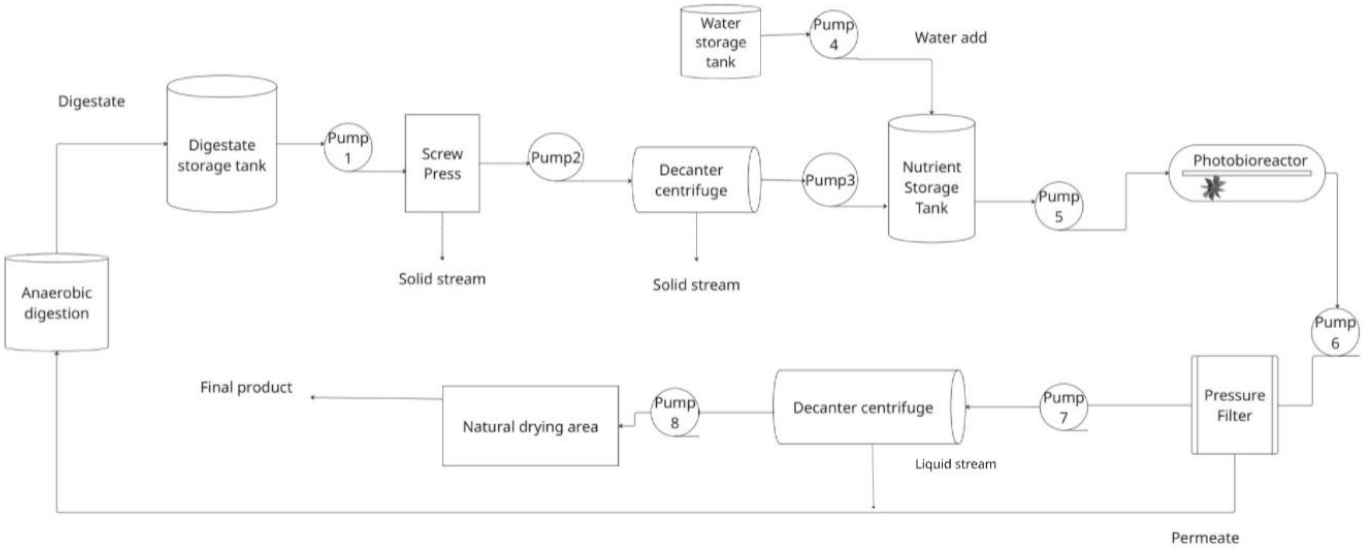
Η συνολική διεργασία παραγωγής βιομάζας προς αξιοποίηση ως βιολίπασμα διακρίνεται σε τρία κύρια στάδια: την προεπεξεργασία του χωνεμένου υπολείμματος, την καλλιέργεια των μικροφυκών σε ανοικτό σύστημα εντός θερμοκηπίου και τη συγκομιδή, συμπύκνωση και τελική ξήρανση της παραγόμενης βιομάζας.

Στο πρώτο στάδιο, το χωνεμένο υπόλειμμα (digestate) αποθηκεύεται αρχικά σε δεξαμενή, η οποία λειτουργεί ως ενδιάμεσος χώρος αποθήκευσης, απορροφώντας τις διακυμάνσεις της εισερχόμενης παροχής και εξασφαλίζοντας ελεγχόμενη τροφοδοσία της διεργασίας. Στη συνέχεια, το ρεύμα τροφοδοτείται μέσω αντλίας σε κοχλιόπρεσσα (screw press), όπου πραγματοποιείται ένας πρώτος διαχωρισμός στερεού-υγρού και απομακρύνεται μέρος των μεγαλύτερων αιωρούμενων στερεών. Το υγρό κλάσμα που προκύπτει τροφοδοτείται σε οριζόντιο φυγοκεντριτή τύπου decanter, όπου επιτυγχάνεται περαιτέρω απομάκρυνση των λεπτότερων στερεών. Τα ρεύματα στερεών του επεξεργασμένου digestate μπορούν και αυτά να χρησιμοποιούν ως λίπασμα και να αποτελέσουν ένα επιπλέον έσοδο για την μονάδα. Ο συνδυασμός των δύο σταδίων αποσκοπεί στη μείωση της συγκέντρωσης των αιωρούμενων στερεών και της θολότητας του χωνεμένου υπολείμματος, ώστε να περιοριστεί η παρεμπόδιση της διείσδυσης του φωτός στο καλλιεργητικό μέσο. Το προεπεξεργασμένο υγρό κλάσμα οδηγείται στη συνέχεια στη δεξαμενή παρασκευής και αποθήκευσης του μέσου, όπου αναμιγνύεται με την απαιτούμενη ποσότητα νερού ώστε να διαμορφωθεί η κατάλληλη σύσταση, δηλαδή 4% v/v για την καλλιέργεια των μικροφυκών. Η απαιτούμενη αραίωση προσδιορίστηκε βάσει των αναγκών της παραγόμενης βιομάζας σε άζωτο και φώσφορο. Από τη σύγκριση της διαθεσιμότητας των δύο θρεπτικών στοιχείων με τις αντίστοιχες στοιχειομετρικές απαιτήσεις της βιομάζας, ο φώσφορος προσδιορίστηκε ως το περιοριστικό θρεπτικό συστατικό και χρησιμοποιήθηκε ως βάση για τον υπολογισμό της απαιτούμενης ποσότητας χωνεμένου υπολείμματος.

Στο δεύτερο στάδιο, το παρασκευασμένο καλλιεργητικό μέσο τροφοδοτείται σε ανοικτό αντιδραστήρα τύπου raceway pond. Η κυκλοφορία του καλλιεργητικού μέσου εντός της λίμνης εξασφαλίζεται μέσω πτερυγίου ανάδευσης, ώστε να περιορίζεται η καθίζηση της βιομάζας και να επιτυγχάνεται καλύτερη κατανομή των θρεπτικών συστατικών και της διαθέσιμης ακτινοβολίας. Η λειτουργία της λίμνης θεωρείται ημισυνεχής, με ημερήσια απομάκρυνση συγκεκριμένης ποσότητας καλλιεργητικού υγρού και αντίστοιχη αναπλήρωσή του με νέο μέσο.

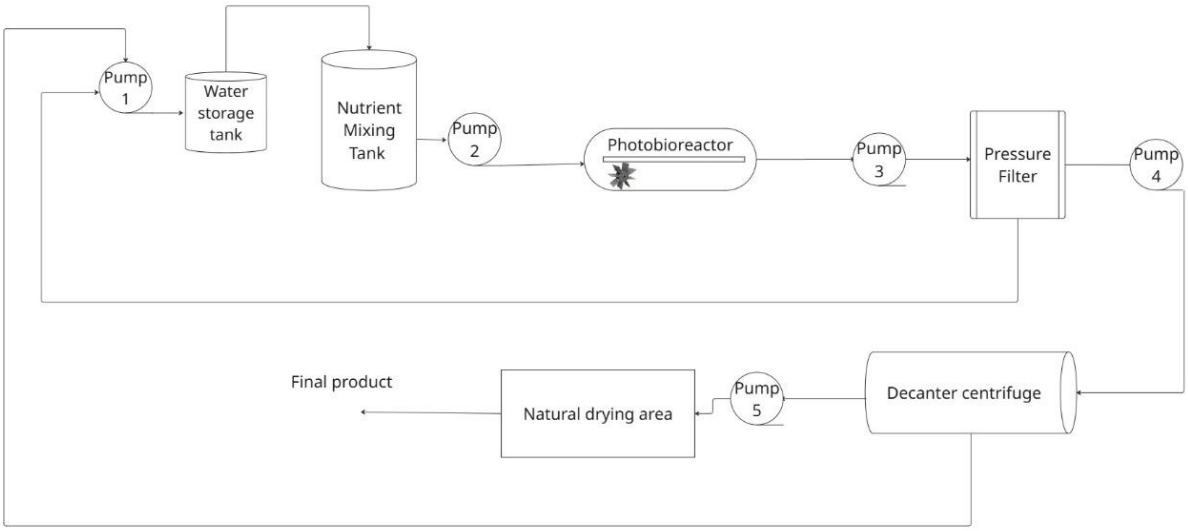
Στο τελικό στάδιο πραγματοποιείται η συγκομιδή και η σταδιακή αφυδάτωση της βιομάζας. Κατά τη διεργασία αυτή, το εξερχόμενο από τον αντιδραστήρα ρεύμα διέρχεται αρχικά από φίλτρα. Διερχόμενο παράλληλα με την επιφάνεια της μεμβράνης, το μεγαλύτερο μέρος της υγρής φάσης τη διαπερνά ως διήθημα, ενώ τα κύτταρα των μικροφυκών συγκρατούνται και συγκεντρώνονται στο ρεύμα κατακράτησης. Η διήθηση μέσω φίλτρων συχνά χρησιμοποιείται ως αρχικό στάδιο αφυδάτωσης λόγω της ικανότητάς της να απομακρύνει μεγάλου μέρους του νερού πριν από τα επόμενα, περισ-

σότερο ενεργοβόρα στάδια αφυδάτωσης (Fasaei, Bitter, Slegers, & van Boxtel, 2018). Η συμπυκνωμένη βιομάζα που συγκρατείται από τα φίλτρα οδηγείται στη συνέχεια σε οριζόντιο φυγοκεντριτή, όπου πραγματοποιείται το δεύτερο στάδιο αφυδάτωσης και η συγκέντρωση της βιομάζας αυξάνεται περαιτέρω. Το τελικό ρεύμα οδηγείται σε χώρο φυσικής ξήρανσης έως ότου επιτευχθεί η επιθυμητή τελική περιεκτικότητα σε υγρασία του παραγόμενου βιολιπάσματος.



Διάγραμμα 9.1: Συνολική διεργασία παραγωγής βιολιπάσματος από μικροφύκη για το Σενάριο 2.

Το Σενάριο 1 διαμορφώνεται παρόμοια με το δεύτερο, με την διαφορά ότι το διάλυμα ανόργανων θρεπτικών που χρησιμοποιείται, διαλύεται πρώτα σε μια μικρότερου μεγέθους δεξαμενή με ανάδευση και προστίθεται έπειτα στην δεξαμενή μέσου. Σημαντική διαφορά με το Σενάριο 2 είναι ότι τα θρεπτικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε συγκεντρώσεις ακριβώς ανάλογες με τις απαιτήσεις της παραγόμενης βιομάζας σε καθένα από αυτά, οπότε το νερό που προκύπτει από τα στάδια αφυδάτωσης μπορεί να ξαναχρησιμοποιηθεί χωρίς να υπάρξει συσσώρευση των θρεπτικών. Έτσι, το νερό που προκύπτει από τα φίλτρα και την φυγόκεντρο με αντλία ανακυκλώνεται πίσω στη δεξαμενή του μέσου μειώνοντας σημαντικά τις απαιτήσεις σε νερό.



Διάγραμμα 9.2: Συνολικό διάγραμμα ροής διεργασίας παραγωγής βιολιπάσματος για το Σενάριο 1

9.3 ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΗ ΚΑΙ ΧΡΟΝΙΚΟΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑΣ

Για τις ανάγκες του τεχνικού σχεδιασμού καθορίστηκε συγκεκριμένη στρατηγική λειτουργίας των επιμέρους σταδίων της μονάδας, με σκοπό την αντιπροσωπευτική αποτύπωση των πραγματικών συνθηκών λειτουργίας και τον ορθό προσδιορισμό των ωριαίων παροχών, των απαιτούμενων δυναμικοτήτων του εξοπλισμού και των αντίστοιχων ενεργειακών καταναλώσεων.

Τα στάδια μηχανικής επεξεργασίας θεωρήθηκε ότι λειτουργούν σε καθορισμένο ημερήσιο χρονικό διάστημα. Ειδικότερα, η προεπεξεργασία του χωνεμένου υπολείμματος θεωρήθηκε ότι πραγματοποιείται για 8 h d^{-1}. Η παρουσία δεξαμενών αποθήκευσης πριν και μετά την προεπεξεργασία παρέχει την απαραίτητη εξισορρόπηση των ροών και επιτρέπει τη χρονική αποσύζευξη της προεπεξεργασίας από την καλλιέργεια. Για αυτόν τον λόγο, δεν απαιτείται η λειτουργία της γραμμής προεπεξεργασίας να συμπίπτει χρονικά με το στάδιο συγκομιδής.

Η συγκομιδή της βιομάζας θεωρήθηκε ότι πραγματοποιείται κατά τις νυχτερινές ώρες, ενώ η τροφοδοσία φρέσκου καλλιεργητικού μέσου προς τη λίμνη θεωρήθηκε ότι πραγματοποιείται επί 2 h $d^{-1,}$ λίγο πριν την ανατολή του ηλίου. Η χρονική αυτή αλληλουχία στοχεύει στην μέγιστη αξιοποιήση του διαθέσιμου ηλιακού φωτός κατά την διάρκεια της ημέρας . Τα επιμέρους στάδια αρχικής συμπύκνωσης και αφυδάτωσης της βιομάζας θεωρήθηκε ότι λειτουργούν για 8 h d^{-1} κατά τη διάρκεια της νύχτας, ώστε η ημερήσια ποσότητα βιομάζας να επεξεργάζεται σε μεγαλύτερο χρονικό διάστημα και να περιορίζεται η απαιτούμενη δυναμικότητα του αντίστοιχου εξοπλισμού. Η επιλογή αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική για το στάδιο της αφυδάτωσης, το οποίο συγκαταλέγεται στα πλέον ενεργοβόρα στάδια της συνολικής διεργασίας.

9.4 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΑ ΑΝΟΙΚΤΟΥ ΤΥΠΟΥ

9.4.1 Αρχικές σχεδιαστικές παραδοχές

Για τη διαστασιολόγηση της λίμνης καλλιέργειας και την ανάπτυξη του υπολογιστικού μοντέλου υιοθετήθηκε ένα σύνολο βασικών σχεδιαστικών και λειτουργικών παραδοχών. Το λειτουργικό βάθος των ανοιχτών λιμνών κυμαίνεται συνήθως από 20 έως 30 cm (Skifa et al., 2025b). Μικρότερα βάθη,

ευνοούν την καλύτερη διέλευση του φωτός στην καλλιέργεια και περιορίζουν την φωτοσκίαση, ιδιαίτερα όσο αυξάνεται η συγκέντρωση της βιομάζας. Ωστόσο, για δεδομένη δυναμικότητα παραγωγής, οδηγούν σε μεγαλύτερη απαιτούμενη επιφάνεια καλλιέργειας και, κατά συνέπεια, σε αυξημένες απαιτήσεις γης και μεγαλύτερες συνολικές απώλειες νερού λόγω εξάτμισης. Στην παρούσα εργασία επιλέχθηκε λειτουργικό βάθος 30 cm, το οποίο αντιστοιχεί στην ανώτερη τιμή του βιβλιογραφικού εύρους, ως συμβιβασμός μεταξύ της επαρκούς διαθεσιμότητας φωτός και του περιορισμού της απαιτούμενης επιφάνειας και, κατ' επέκταση, των σχετικών οικονομικών απαιτήσεων.

Η λειτουργία του συστήματος προσεγγίστηκε ως ημισυνεχής, με τη συγκέντρωση της βιομάζας να διατηρείται στα 0.5 g L^{-1}.(Davis et al., 2016) . Η συγκεκριμένη τιμή επιλέχθηκε ώστε να περιορίζεται το φαινόμενο της αυτοσκίασης και η εξασθένηση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας με το βάθος της καλλιέργειας. Σε υψηλότερες συγκεντρώσεις βιομάζας, η απορρόφηση και σκέδαση του φωτός από τα κύτταρα αυξάνονται, με αποτέλεσμα τη σημαντική μείωση της διαθέσιμης ακτινοβολίας στα βαθύτερα στρώματα της καλλιέργειας. Για τη διατήρηση της επιλεγμένης συγκέντρωσης θεωρήθηκε η ημερήσια απομάκρυνση κατάλληλου όγκου καλλιεργητικού εναιωρήματος και η αντικατάστασή του από ισόποση ποσότητα φρέσκου καλλιεργητικού μέσου, ώστε να διατηρείται σταθερός ο ενεργός όγκος της λίμνης.

Η επιλογή λόγου μήκους και πλάτους (L/W) επιλέχθηκε ίση με 10. Η επιλογή της συγκεκριμένης αναλογίας βασίστηκε σε βιβλιογραφικά δεδομένα σχεδιασμού ανοικτών λιμνών τύπου raceway, στα οποία αντίστοιχες επιμήκεις γεωμετρίες χρησιμοποιούνται για τη διατήρηση ομαλής κυκλοφορίας του καλλιεργητικού μέσου και τον περιορισμό της ανάπτυξης περιοχών χαμηλής ταχύτητας. Η γεωμετρία της λίμνης αποτελεί σημαντική παράμετρο της υδροδυναμικής της συμπεριφοράς, καθώς επηρεάζει την ομοιομορφία της ταχύτητας, τις απώλειες κατά μήκος των καναλιών και τον σχηματισμό νεκρών ζωνών (Sawant et al., 2019).

Πίνακας 9: Σχεδιαστικές παράμετροι του αντιδραστήρα που επιλέγονται μετά από βιβλιογραφική ανασκόπηση.

Σχεδιαστική παράμετρος	Τιμή
Λειτουργικό βάθος καλλιέργειας, H [cm]	30
Συγκέντρωση βιομάζας κατά τη συλλογή, X_{target} [g L^{-1}]	0.5
Λόγος μήκους και πλάτους αντιδραστήρα, L/W	10

9.4.2 Προσδιορισμός μέσης έντασης φωτός

Η διαθεσιμότητα φωτός αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες που καθορίζουν την αυτότροφη ανάπτυξη των μικροφυκών, καθώς η φωτοσυνθετική δραστηριότητα και ο ειδικός ρυθμός ανάπτυξης της βιομάζας εξαρτώνται άμεσα από την ένταση της ακτινοβολίας (Alavianghavanini et al., 2024) . Ωστόσο, η ακτινοβολία που προσπίπτει στην ελεύθερη επιφάνεια της λίμνης δεν είναι αντιπροσωπευτική της ακτινοβολίας στην οποία εκτίθεται το σύνολο της βιομάζας. Καθώς η φωτεινή ακτινοβολία διεισδύει στο μέσο καλλιέργειας, η έντασή της μειώνεται προοδευτικά λόγω της απορρόφησης και της σκέδασής της από το νερό και τα αιωρούμενα στερεά. Για τον λόγο αυτό, για την κινητική περιγραφή της ανάπτυξης δεν χρησιμοποιήθηκε απευθείας η προσπίπτουσα ένταση φωτός I_o, αλλά υπολογίστηκε μία μέση τιμή ακτινοβολίας I_{avg} αντιπροσωπευτική του συνολικού βάθους της καλλιέργειας.

Η εξασθένηση της φωτεινής ακτινοβολίας ως προς το βάθος της λίμνης προσεγγίστηκε μέσω του νόμου Beer–Lambert (Εξίσωση 1), ο οποίος χρησιμοποιείται ευρέως για την περιγραφή της διάδοσης του φωτός σε συστήματα καλλιέργειας μικροφυκών. Καθώς η ακτινοβολία διαδίδεται από την

ελεύθερη επιφάνεια προς τα βαθύτερα στρώματα της καλλιέργειας μειώνεται προοδευτικά λόγω φαινομένων απορρόφησης και σκέδασης. Για την περιγραφή της μεταβολής αυτής, ως Io ορίζεται η προσπίπτουσα ένταση της ακτινοβολίας στην ελεύθερη επιφάνεια της λίμνης, ως I(z) η τοπική ένταση σε βάθος z, ενώ η παράμετρος k_0 αντιπροσωπεύει τον συνολικό συντελεστή εξασθένισης της ακτινοβολίας.

$$I_{avg}\left[\frac{\mu mol}{m^2 s}\right] = \frac{I_0(1 - exp[-k_0 z])}{k_0 z} \quad (1)$$

Ο υπολογισμός του συντελεστή εξασθένησής, k_0, διαφοροποιήθηκε μεταξύ των δύο εξεταζόμενων σεναρίων. Στο Σενάριο 1, όπου χρησιμοποιείται συμβατικό καλλιεργητικό μέσο, η μεταβολή του αποδίδεται κυρίως στην συγκέντρωση της βιομάζας. Αντίθετα, στο Σενάριο 2, η παρουσία χωνεμένου υπολείμματος μεταβάλλει επιπλέον τα οπτικά χαρακτηριστικά του καλλιεργητικού μέσου, κυρίως λόγω του χρώματος και των αιωρούμενων στερεών που περιέχει. επηρεάζεται από τις οπτικές ιδιότητες του μέσου και από τη συγκέντρωση της βιομάζας. Πιο συγκεκριμένα, αιωρούμενα και κολλοειδή σωματίδια απορροφούν μέρος της έντασης του φωτός με αποτέλεσμα μικρότερο μέρος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας να φτάνει στα βαθύτερα στρώματα του βιοαντιδραστήρα. Παρόμοια φυσική σημασία έχει ο όρος της βιομάζας (Εξίσωση 2) καθώς η αύξηση της κυτταρικής πυκνότητας ενισχύει την απορρόφηση, τη σκέδαση και την αυτοσκίαση, περιορίζοντας τη διείσδυση του φωτός σε μεγαλύτερα βάθη (Benson & Rusch, 2006).

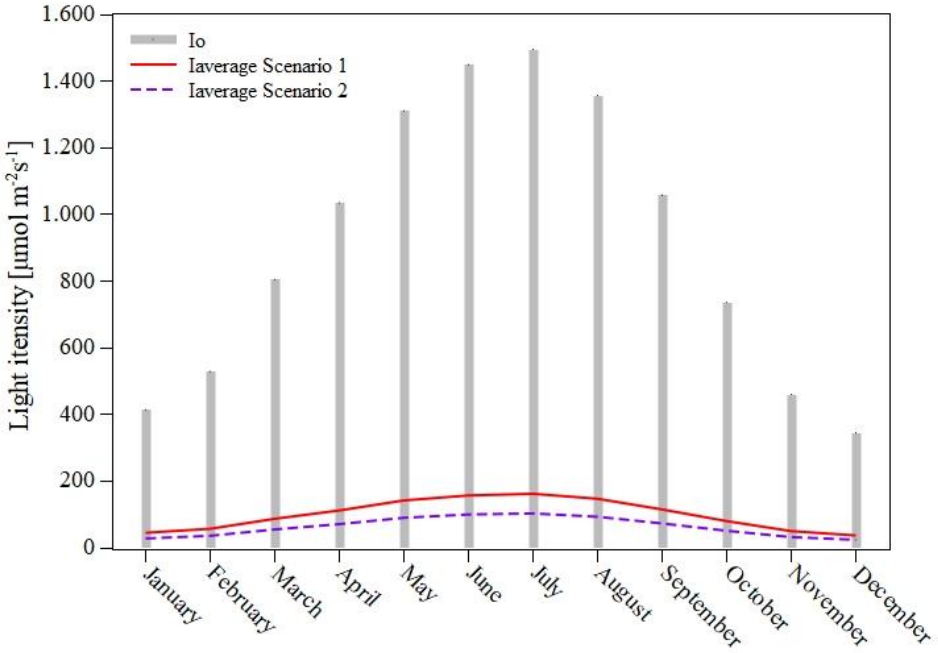
Λαμβάνοντας δεδομένα από την περιοχή που επρόκειτο να σχεδιαστεί η εγκατάσταση για την προσπίπτουσα ακτινοβολία και θεωρώντας πως η βιομάζα που θα απομακρύνεται έχει σταθερή συγκέντρωση και ίση με 0.5 g L^{-1} προκύπτει ο παράγοντας εξασθένισης του φωτός στις δύο περιπτώσεις ενώ στο Σενάριο 2 υπολογίζεται ο παράγοντας εξασθένισης λόγω παρουσίας digestate ο οποίος διαιρείται με τον παράγοντα απορρόφησης (2.303) και προκαλεί επιπλέον σκέδαση της ακτινοβολίας του αντιδραστήρα (Εξίσωση 3). Πιο συγκεκριμένα, στο Σενάριο 2 με την παρουσία του digestate ο συνολικός παράγοντας εξασθένισης υπολογίστηκε $48.4\ m^{-1}$ ενώ αντίθετα στην περίπτωση του Σεναρίου 1 υπολογίστηκε $30.72\ m^{-1}$. Το αποτέλεσμα αυτό οφείλεται στην παρουσία κολλοειδών στερεών στον βιοαντιδραστήρα τα οποία προκαλούν επιπλέον απορρόφηση του φωτός.

$$k_0[m^{-1}] = 1.97 + 0.0575X + k_{dig} \quad (2)$$

$$k_{dig} = \frac{OD_{dig} x_{dig}}{2.303 * 100} \quad (3)$$

Από τα αποτελέσματα του Διαγράμματος 3 προκύπτει η σαφής εποχική μεταβολή της διαθέσιμης φωτεινής ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια του έτους (Διάγραμμα 9.3). Αναλυτικότερα, για το παράδειγμα του Σεναρίου 1 η μέση μέγιστη ένταση ακτινοβολίας φτάνει στα $103\ \frac{\mu mol}{m^2 s}$ ενώ στην περίπτωση του δεν υπάρχει χωνεμένο υπόλειμμα μέσα στην λίμνη η τιμή αυτή προσεγγίζει τα $162\ \frac{\mu mol}{m^2 s}$. Οι (Alavianghavanini et al., 2024) για την περίπτωση χωροθέτησης του ανοικτού αντιδραστήρα στην Αυστραλία υπολόγισαν την μέγιστη μέση μηνιαία ακτινοβολία στα $530\ \frac{\mu mol}{m^2 s}$. Παράλληλα, για την ελάχιστη μέση μηνιαία ακτινοβολία για το Σενάριο 1 και 2 υπολογίστηκαν $37\ \frac{\mu mol}{m^2 s}$ και $24\ \frac{\mu mol}{m^2 s}$ αντίστοιχα, ενώ ο αντίστοιχος υπολογισμός των (Alavianghavanini, 2024) ήταν $190\ \frac{\mu mol}{m^2 s}$. Το γεγονός αυτό, οφείλεται στις καλύτερες γεωγραφικές κλιματικές συνθήκες της Αυστραλίας συγκριτικά με την

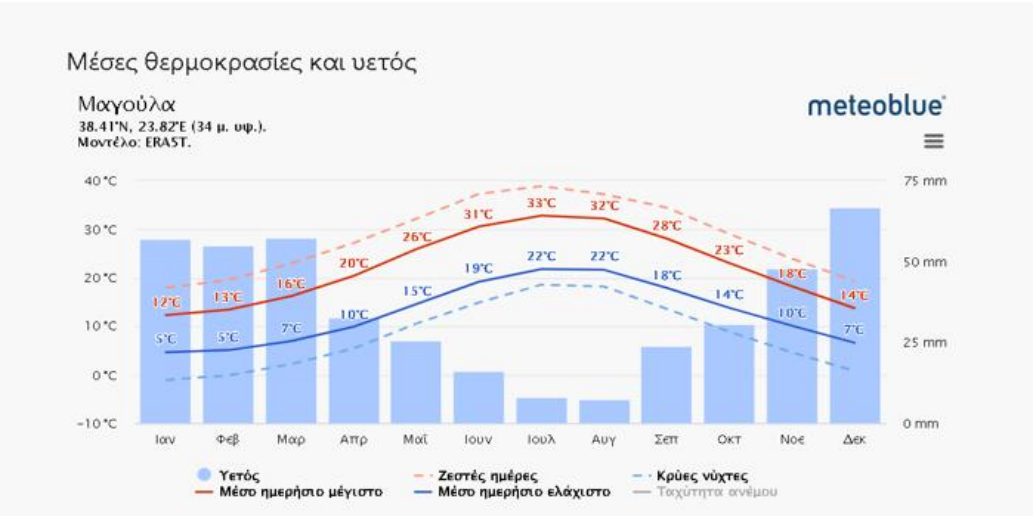
χωροθέτηση της συγκεκριμένης μονάδας . Ωστόσο, η περιοχή χρησιμοποιείται ως αντιπροσωπευτική βάση σχεδιασμού για τις τοπικές κλιματικές συνθήκες και όχι ως βέλτιστη τοποθεσία από πλευράς ηλιακού δυναμικού.



Διάγραμμα 9.3: Εποχική διαφοροποίηση της προσπίπτουσας έντασης της ακτινοβολίας Io, και της μέσης έντασης εντός της καλλιέργειας για τα δύο σενάρια, Iaverage Scenario 1 και Iaverage Scenario 2

9.4.3 Προσδιορισμός μέσης θερμοκρασίας

Η εκτίμηση των θερμοκρασιακών συνθηκών λειτουργίας βασίστηκε στα διαθέσιμα κλιματικά δεδομένα της περιοχής εγκατάστασης. Για κάθε μήνα ήταν διαθέσιμες η μέση ημερήσια μέγιστη και η μέση ημερήσια ελάχιστη θερμοκρασία περιβάλλοντος (Διάγραμμα 9.4), οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση μιας αντιπροσωπευτικής μέσης ημερήσιας θερμοκρασίας περιβάλλοντος. Ο υπολογισμός πραγματοποιήθηκε με τη χρήση των συντελεστών στάθμισης α και β, οι οποίοι εκτιμήθηκαν βάσει αναλυτικότερων θερμοκρασιακών δεδομένων γειτονικής περιοχής και εφαρμόστηκαν στα δεδομένα της περιοχής εγκατάστασης (Εξίσωση 4). Οι δύο συντελεστές έχουν άθροισμα ίσο με τη μονάδα και εκφράζουν τη σχετική συμβολή της μέσης ημερήσιας ελάχιστης (a) και της μέσης ημερήσιας μέγιστης θερμοκρασίας (b) στη διαμόρφωση της μέσης ημερήσιας τιμής.

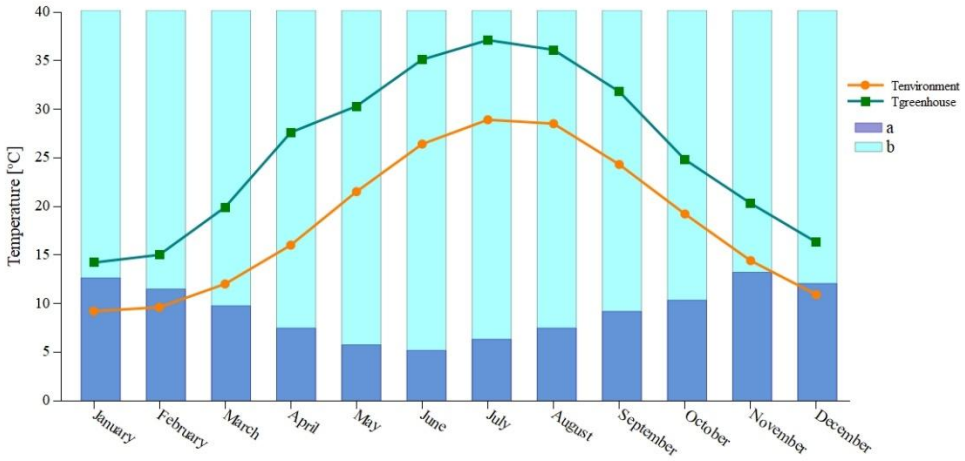


Διάγραμμα 9.4: Μηνιαία μέση μέγιστη και ελάχιστη θερμοκρασία στην περιοχή της εγκατάστασης (Meteoblue, 2026) .

$$T_{environment}[K] = aT_{min} + bT_{max} \quad (4)$$

Στη συνέχεια, για την εκτίμηση των θερμοκρασιακών συνθηκών στο εσωτερικό του θερμοκηπίου, λήφθηκε υπόψη η αναμενόμενη διαφοροποίησή τους από τις αντίστοιχες θερμοκρασίες του εξωτερικού περιβάλλοντος, $T_{environment}$. Η διαφοροποίηση αυτή μεταβάλλεται εποχικά και εξαρτάται από τις επικρατούσες κλιματικές συνθήκες. Σύμφωνα με τεχνικά δεδομένα που παρασχέθηκαν από βιομηχανική εγκατάσταση με θερμοκήπιο, η ελάχιστη θερμοκρασία στο εσωτερικό του μπορεί να είναι περίπου 3 °C υψηλότερη από την αντίστοιχη εξωτερική θερμοκρασία. Αντίστοιχα, η μέγιστη εσωτερική θερμοκρασία μπορεί να υπερβαίνει την εξωτερική κατά περίπου 10 – 12 °C κατά τους χειμερινούς μήνες και έως 15 °C κατά τους θερινούς μήνες. Με βάση τις εκτιμώμενες ελάχιστες και μέγιστες θερμοκρασίες στο εσωτερικό του θερμοκηπίου και εφαρμόζοντας τους ίδιους συντελεστές στάθμισης a και b, υπολογίστηκε για κάθε μήνα μια αντιπροσωπευτική μέση ημερήσια θερμοκρασία εντός του θερμοκηπίου, $T_{greenhouse}$ (Διάγραμμα 9.5).

Η μέση θερμοκρασία στο εσωτερικό του θερμοκηπίου μεγιστοποιείται κατά τον Ιούλιο και υπερβαίνει τη βέλτιστη θερμοκρασία ανάπτυξης της Chlorella vulgaris,(26.96 °C). Παρόλα αυτά, η χρήση θερμοκηπίου παραμένει σημαντική, καθώς περιορίζει τις έντονες θερμοκρασιακές πτώσεις κατά τις νυχτερινές ώρες και τις ψυχρότερες περιόδους, δημιουργώντας σταθερότερο περιβάλλον καλλιέργειας. Ωστόσο, κατά τους θερινούς μήνες η συσσώρευση θερμότητας μπορεί να οδηγήσει σε θερμοκρασίες υψηλότερες από τη βέλτιστη, γεγονός που καθιστά αναγκαία την ανανέωση του αέρα. Για τον λόγο αυτό εισάγεται στο ενεργειακό ισοζύγιο η παροχή αερισμού, μέσω της οποίας απομακρύνεται μέρος της αισθητής θερμότητας και περιορίζεται η υπερθέρμανση του θερμοκηπίου.



Διάγραμμα 9.5: Εποχική διαφοροποίηση θερμοκρασίας περιβάλλοντος και θερμοκηπίου και των αδιάστατων παραμέτρων a, b.

9.4.4 Προσδιορισμός κινητικής ανάπτυξης μικροφυκών

Για την εκτίμηση του μέγιστου ειδικού ρυθμού ανάπτυξης μ_{max} του στελέχους χρησιμοποιήθηκε μαθηματικό μοντέλο παλινδρόμησης (Εξίσωση 5), το οποίο αναπτύχθηκε με βάση πειραματικά δεδομένα καλλιέργειας του υπό διαφορετικούς συνδυασμούς περιβαλλοντικών συνθηκών. Σκοπός του μοντέλου ήταν η ποσοτική διερεύνηση της επίδρασης των κυριότερων παραμέτρων που καθορίζουν την ανάπτυξη της καλλιέργειας, ειδικότερα, της θερμοκρασίας, της διάρκειας της φωτοπεριόδου και της έντασης της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Με την εισαγωγή στο μοντέλο των αντίστοιχων μέσων μηνιαίων τιμών των τριών αυτών παραμέτρων προσδιορίστηκε ο μέγιστος ειδικός ρυθμός ανάπτυξης μ_{max}. Στη συνέχεια, η μέγιστη επιφανειακή παραγωγικότητα της καλλιέργειας, Pr_{max}, υπολογίστηκε μέσω της εξίσωσης 1 και των πρότερα καθορισμένων παραμέτρων συγκέντρωσης στόχου, X_{target} (g L^{-1}) και βάθους της καλλιέργειας, H_{pond} (m) (Εξίσωση 6).

$$\mu_{max}[d^{-1}] = 0.045T_{pond} + 0.0259light - 0.48 * 10^{-4}I_0 - 0.84 * 10^{-3}T_{pond}^2 - 0.66 * 10^{-3}light^2 - 0.65 \quad (5)$$

$$Pr_{max}[kg\ m^{-3}d^{-1}] = \mu_{max} * X_{target} * H_{pond} \quad (6)$$

Για την προσαρμογή, όμως, της εργαστηριακά επιτευχθείσας μέγιστης παραγωγικότητας, Pr_{max}, στις πραγματικές συνθήκες λειτουργίας, Pr_{real}, στο μοντέλο εισήχθησαν δύο αδιάστατοι συντελεστές, οι οποίοι πρέπει να προσδιορίζονται ειδικά για κάθε στέλεχος (Εξίσωση 6). Ο συντελεστής του φωτός, $\varphi(I_C)$ (Εξίσωση 8), προσδιορίζεται γενικά πειραματικά αναπτύσσοντας το εκάστοτε στέλεχος σε διαφορετικές ελεγχόμενες εντάσεις ακτινοβολίας αποτυπώνοντας ποσοτικά το βαθμό στον οποίο η διαθέσιμη ακτινοβολία περιορίζει την ανάπτυξη της καλλιέργειας. Αντίστοιχα, ο συντελεστής της θερμοκρασίας, $\varphi(T_c)$ (Εξίσωση 9), εκφράζει την επίδραση της θερμοκρασίας στην ανάπτυξη της καλλιέργειας σε συνάρτηση με τη βέλτιστη θερμοκρασία ανάπτυξης, T_{opt}, καθώς και τις οριακές θερμοκρασίες T_{min} και T_{max} στις οποίες παύει η ανάπτυξη (Alavianghavanini et al., 2024). Οι παράμετροι n και K_{sp} για το φως, καθώς και οι οριακές θερμοκρασίες αντλήθηκαν βιβλιογραφικά, ενώ η τιμή της

T_{opt} προσδιορίστηκε βάσει πειραματικών δεδομένων παράλληλης διπλωματικής εργασίας (Πίνακας 10).

$$Pr_{real}[kg\ m^{-3}d^{-1}] = Pr_{max} * \varphi(T_c) * \varphi(I_C) \quad (7)$$

$$\varphi(I_C) = \frac{I_{avg}^n}{I_{avg}^n + K_{sp}} \quad (8)$$

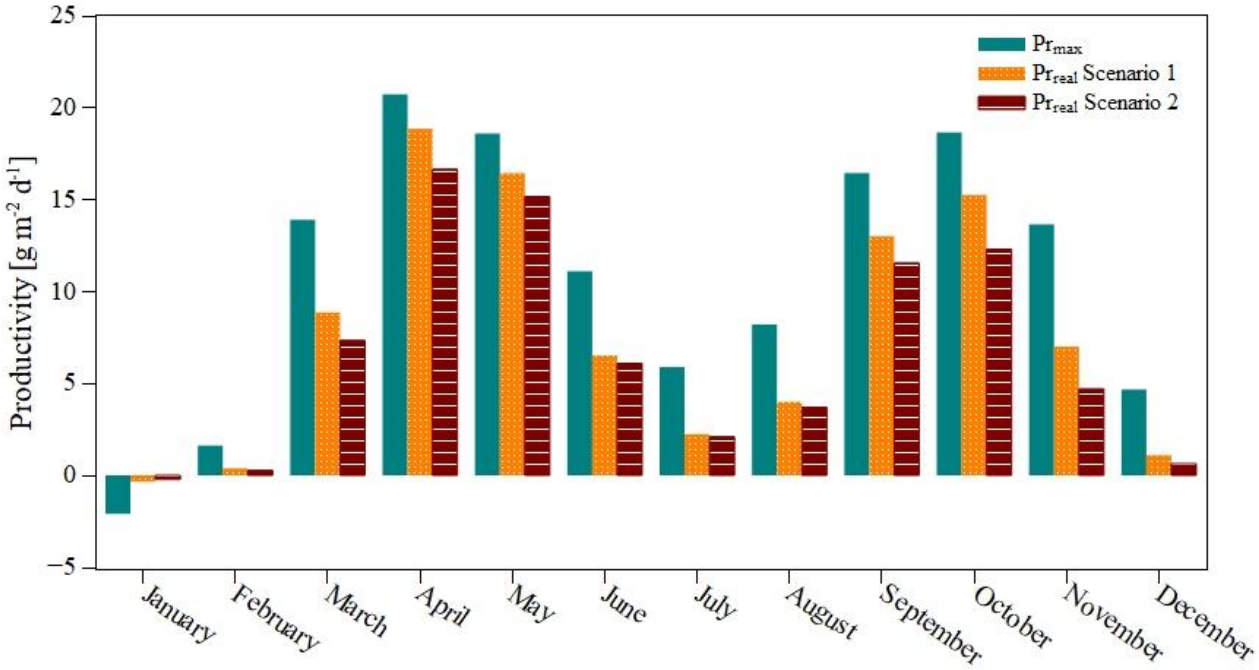
$$\varphi(T_c) = \frac{(T_c - T_{max})(T_c - T_{min})^2}{(T_{opt} - T_{min})((T_{opt} - T_{min})(T_c - T_{opt}) - (T_{opt} - T_{max})(T_{opt} + T_{min} - 2T_c))} \quad (9)$$

Πίνακας 10: Συγκεντρωτικός πίνακας παραμέτρων ανάπτυξης μοντέλου μικροφυκών.

Παράμετρος	Τιμή	Αναφορά
Ελάχιστη θερμοκρασία ανάπτυξης, T_{min} (^oC)	10	(Kalinina et al., 2023)
Μέγιστη θερμοκρασία ανάπτυξης, T_{max} (^oC)	40	(Kalinina et al., 2023)
Βέλτιστη θερμοκρασία ανάπτυξης, T_{opt} (^oC)	26.96	LBEET 2026
Παράγοντας Hill, n	2	(Barnett et al., 2015)
Παράγοντας ημικορεσμού φωτός, $K_{sp}(\mu mol\ m^{-2}\ s^{-1})$	35	(Dall'Osto et al., 2019)

Από το Διάγραμμα 9.6 προκύπτει η σαφής εποχική διαφοροποίηση της παραγωγικότητας όπως συνέβη και με την μέση ηλιακή ακτινοβολία. Κατά τους χειμερινούς μήνες οι χαμηλότερες θερμοκρασίες και η περιορισμένη διαθεσιμότητα ηλιακής ακτινοβολίας οδηγούν σε σημαντική μείωση των αντίστοιχων διορθωτικών συντελεστών και σε ιδιαίτερα χαμηλή πραγματική παραγωγικότητα. Υπό τις συνθήκες αυτές, η διατήρηση της καλλιέργειας σε πλήρη παραγωγική λειτουργία κατά τη συγκεκριμένη περίοδο δεν κρίνεται αποδοτική από σχεδιαστική άποψη.

Για τον λόγο αυτό, ως ενεργή περίοδος λειτουργίας του βιοαντιδραστήρα επιλέχθηκε το χρονικό διάστημα από τον Μάρτιο έως και τον Νοέμβριο, το οποίο αντιστοιχεί σε συνολική λειτουργία 9 μηνών ανά έτος. Κατά το διάστημα αυτό, η ελάχιστη, η μέγιστη και η μέση παραγωγικότητα της μονάδας υπολογίστηκαν $16.66\ g\ m^{-2}\ d^{-1}$, $2.11\ g\ m^{-2}\ d^{-1}$ kai $8.85\ g\ m^{-2}\ d^{-1}$ αντίστοιχα για το Σενάριο 2. Παράλληλα, για την περίπτωση παροχής θρεπτικών οι τιμές αυτές υπολογίστηκαν $18.86\ g\ m^{-2}\ d^{-1}$, $2.25\ g\ m^{-2}\ d^{-1}$ kai $10.25\ g\ m^{-2}\ d^{-1}$. Η επιλογή λειτουργίας κατά τους συγκεκριμένους μήνες επιτρέπει τη συγκέντρωση της παραγωγικής δραστηριότητας στους μήνες κατά τους οποίους οι συνθήκες θερμοκρασίας και ακτινοβολίας ευνοούν περισσότερο την ανάπτυξη του επιλεγμένου στελέχους, περιορίζοντας παράλληλα τη λειτουργία του συστήματος σε περιόδους κατά τις οποίες η αναμενόμενη παραγωγή βιομάζας είναι ιδιαίτερα χαμηλή.



Διάγραμμα 9.6: Γραφική απεικόνιση της σχετικής εποχικής μεταβολής μέγιστης, Pr_{max} και πραγματικής παραγωγικότητας, Pr_{real} για τα δύο Σενάρια

9.4.5 Προσδιορισμός διαστάσεων λίμνης

Έπειτα από τον προσδιορισμό της πραγματικής παραγωγικότητας και τον καθορισμό της ενεργού περιόδου λειτουργίας της καλλιέργειας, ακολούθησε η διαστασιολόγηση του βιοαντιδραστήρα.

Για τους εννιά μήνες λειτουργίας υπολογίστηκε αρχικά η μέση πραγματική επιφανειακή παραγωγικότητα της καλλιέργειας. Η μέση αυτή παραγωγικότητα αποτέλεσε τη βασική παράμετρο για τον προσδιορισμό της απαιτούμενης επιφάνειας καλλιέργειας, καθώς εκφράζει την αναμενόμενη ποσότητα παραγόμενης βιομάζας ανά μονάδα επιφάνειας και χρόνου υπό τις πραγματικές συνθήκες λειτουργίας του συστήματος. Συνεπώς, συνδυάζοντας τον ετήσιο στόχο παραγωγής, Pr (kg y^{-1}) (Πίνακας 7) με τη μέση πραγματική παραγωγικότητα κατά τους μήνες λειτουργίας και τη συνολική διάρκεια λειτουργίας της μονάδας, t_{op} (d), προσδιορίστηκε η απαιτούμενη επιφάνεια της λίμνης.

$$A_m[m^2] = \frac{Pr}{Pr_{real,avg} * t_{op}} \quad (10)$$

Με δεδομένο το προκαθορισμένο λειτουργικό βάθος $(H = 0.30, m)$, ο ενεργός όγκος της λίμνης προέκυψε άμεσα από την υπολογισθείσα επιφάνεια σύμφωνα με τη σχέση 10, ενώ οι διαστάσεις

της λίμνης με δεδομένη την αναλογία L/W υπολογίστηκαν θεωρώντας την ορθογώνιας γεωμετρίας (Εξίσωση 11).

$$V_m[m^3] = A_m * H \tag{11}$$

$$A_m[m^2] = L_m W_m \tag{12}$$

Στη συνέχεια, προσδιορίστηκαν οι απαιτήσεις ημερήσιας συγκομιδής της καλλιέργειας και κατ' επέκταση της παροχή φρέσκιας τροφοδοσίας. Πιο συγκεκριμένα, υπολογίζοντας την μέγιστη παραγωγικότητα του εκάστοτε μήνα η τελευταία μετατράπηκε σε ογκομετρική παροχή V_{daily} προσεγγίζοντας την πυκνότητα του με αυτή του νερού. Έπειτα υπολογίστηκε το μέγιστο ποσοστό απομάκρυνσης βιομάζας για κάθε μήνα ξεχωριστά (Εξίσωση 14) όπου V_m ο συνολικός όγκος του αντιδραστήρα. Στις υπολογισθείσες τιμές εφαρμόστηκε επιπλέον συντελεστής ασφαλείας,ίσος με 0.8 στο ποσοστό συγκομιδής προκειμένου να ληφθούν υπόψη αποκλίσεις από την ιδανική λειτουργία του συστήματος. Έτσι παίρνοντας μία μέση τιμή για τα εκάστοτε ποσοστά απομάκρυνσης για κάθε μήνα υπολογίσαμε το μέσο ποσοστό καθ' όλη την λειτουργία του αντιδραστήρα (Πίνακας 11).

$$V_{daily}[m^3\ d^{-1}] = \frac{Pr_{max}}{X_{out}} \tag{13}$$

$$Harvest_{\%} = \frac{V_{daily}}{V_m} \tag{14}$$

Με τον τρόπο αυτό υπολογίστηκε ο όγκος καλλιεργητικού εναιωρήματος που απαιτείται να απομακρύνεται ημερησίως, ώστε να συλλέγεται η παραγόμενη βιομάζα και να διατηρείται η επιθυμητή συγκέντρωσή της στο εσωτερικό της λίμνης.

Πίνακας 11: Αποτελέσματα σχεδιασμού του αντιδραστήρα ανοιχτού τύπου για τα δύο σενάρια λειτουργίας.

Σχεδιαστική παράμετρος	Υπολογισμένη τιμή	
	Σενάριο 1	Σενάριο 2
Επιφάνεια λίμνης, A_m $[m^2]$	4516.7	5228.5
Λειτουργικός όγκος λίμνης, V_m $[m^3]$	1355.0	1568.5
Μήκος λίμνης, L_m $[m]$	212.5	228.7
Πλάτος λίμνης, W_m $[m]$	21.3	22.9
Παραγόμενη βιομάζα, $\dot{m}_{biomass}$ $[kg\ d^{-1}]$	37.0	
Μέσο ογκομετρικό ποσοστό συγκομιδής, $\dot{V}_{harvesting}$ [%]	5.5	4.7

9.5 Ισοζυγια μαζας

9.5.1 Ισοζύγιο μάζας νερού

Σε μόνιμη κατάσταση λειτουργίας, όπου η συσσώρευση θεωρείται μηδενική το ολικό ισοζύγιο για το νερό δίνεται από την γενική εξίσωση 15 και πιο αναλυτικά από την εξίσωση 16.

$$\sum \dot{m}_{w,in} + \sum \dot{m}_{w,rec} = \sum \dot{m}_{w,out} + \sum \dot{m}_{w,loss} \tag{15}$$

$$\begin{aligned} &\dot{m}_{w,fresh} + \dot{m}_{w,rec,filter} + \dot{m}_{w,rec,dec} \\ &= \dot{m}_{w,pond,out} + \dot{m}_{w,evap} + \dot{m}_{w,product} + \dot{m}_{w,loss} \end{aligned} \tag{16}$$

όπου $\dot{m}_{w,fresh}$ το νερό που συμπληρώνεται ώστε να καλύπτει τις συνολικές απώλειες, $\dot{m}_{w,pond,out}$ το νερό της καλλιέργειας που εξέρχεται από την λίμνη, $\dot{m}_{w,rec,filter}$ και $\dot{m}_{w,rec,dec}$ οι εκροές νερού από το στάδιο του harvesting και dewatering (στην περίπτωση του σεναρίου 1), $\dot{m}_{w,evap}$ το νερό που εξατμίζεται από την λίμνη και το στάδιο της φυσικής εξάτμισης, $\dot{m}_{w,product}$ η υγρασία που παραμένει εντός της βιομάζας του τελικού προιοντος, ενώ $\dot{m}_{w,loss}$ άλλες απώλειες στην παρούσα ανάλυση θεωρούνται αμελητέες.

Με την προσέγγιση της πυκνότητας του ρεύματος συγκομιδής ίση με αυτής του νερού από την ημερήσια ογκομετρική παροχή συγκομιδής, Vdaily (Εξίσωση 13), μπορεί να υπολογιστεί το $\dot{m}_{w,pond,out}$, ενώ το νερό σε μορφή υγρασίας που παραμένει στο τελικό προϊόν υπολογίζεται από την παραγόμενη βιομάζα με δεδομένο ότι η περιεκτικότητα της σε υγρασία ανέρχεται στο 8% w/w, σε αναλογία με αντίστοιχα λιπάσματα μικροφυκών της αγοράς.

Η εξάτμιση αντιμετωπίζεται ως διεργασία μεταφοράς μάζας από την ελεύθερη επιφάνεια του νερού προς τον αέρα του θερμοκηπίου. Ο προσδιορισμός της έγινε με βάση τον πιο ζεστό μήνα, δηλαδή τον Ιούλιο, ως το πιο ακραίο σενάριο εξάτμισης, δυναμικά ανά ώρα για την διάρκεια μιας ημέρας, σε συνδυασμό με τα ισοζύγια ενέργειας θερμοκηπίου και λίμνης. Στη συνέχεια, με βάση τη μέση θερμοκρασία του συστήματος, προσδιορίζεται ο συντελεστής διάχυσης των υδρατμών στον αέρα D_{water} (Εξίσωση 18) (Hall et al., 2024). Για τον υπολογισμό του συντελεστή μεταφοράς μάζας, k_m, απαιτείται επιπλέον ο προσδιορισμός των αδιάστατων αριθμών Schmidt και Sherwood (Εξισώσεις 19 και 20).

$$Re_L = \frac{uL_{pond}}{\nu} \tag{17}$$

$$D_{water} = 2.26 * 10^{-5} \left(\frac{T_K}{273.15}\right)^{1.81} \frac{1}{P} \tag{18}$$

$$Sc = \frac{\nu}{D_{water}} \tag{19}$$

$$Sh = \begin{cases} 0.035 Re^{0.8} Sc^{1/3}, Re > 5 * 10^5 \\ 0.628 Re^{0.5} Sc^{1/3}, Re < 3 * 10^5 \end{cases} \tag{20}$$

$$k_m = \frac{Sh * D_{water}}{L_{pond}} \tag{21}$$

Η χαμηλή τιμή του συντελεστή μεταφοράς μάζας οφείλεται κυρίως στην χαμηλή ταχύτητα του αέρα πάνω από την ελεύθερη επιφάνεια της λίμνης μέσα στο θερμοκήπιο, η οποία περιορίζει την

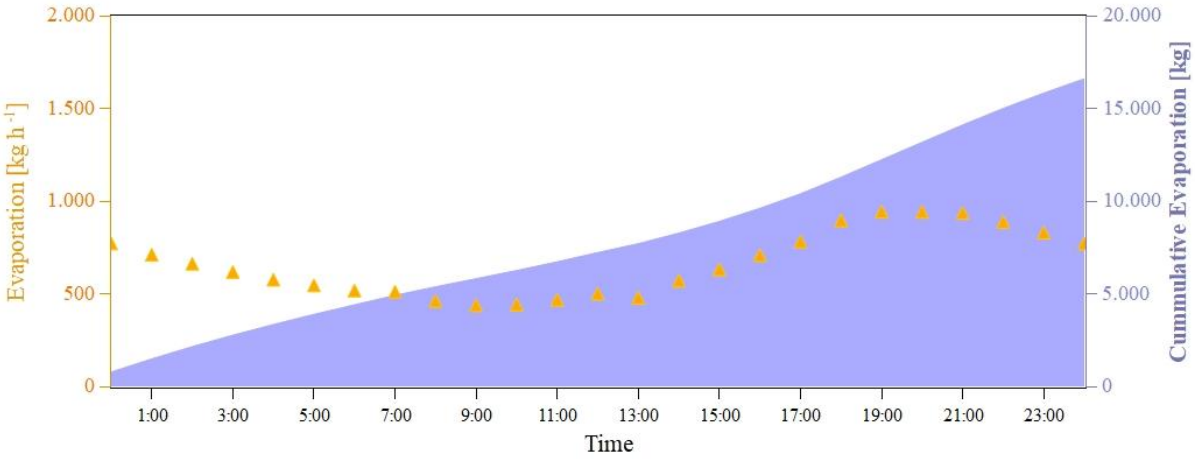
συναγωγική απομάκρυνση των υδρατμών από την επιφάνεια του αντιδραστήρα (Πίνακας 12) . Κατά το φαινόμενο της εξάτμισης, η κινητήρια δύναμη εκφράζεται μέσω της διαφοράς συγκέντρωσης των υδρατμών μεταξύ διεπιφάνειας νερού-αέρα και του κύριου όγκου του αέρα. Στην επιφάνεια του νερού θεωρείται ότι ο αέρας βρίσκεται σε ισορροπία με το νερό και επομένως η μερική πίεση των υδρατμών προσεγγίζει την πίεση κορεσμού του νερού στην θερμοκρασία επιφάνειας. Αντίθετα, στον αέρα του θερμοκηπίου η περιεκτικότητα σε υδρατμούς εξαρτάται από την θερμοκρασία του αέρα και την σχετική υγρασία. Επομένως, όσο μεγαλύτερη είναι η διαφορά μεταξύ της πυκνότητας κορεσμένων υδρατμών στην επιφάνεια του νερού και της πραγματικής πυκνότητας υδρατμών στον αέρα, τόσο μεγαλύτερη είναι η κινητήρια δύναμη για εξάτμιση.

Πίνακας 12: Συγκεντρωτικό πίνακας αριθμητικών παραμέτρων υπολογισμού του συντελεστή μεταφοράς μάζας

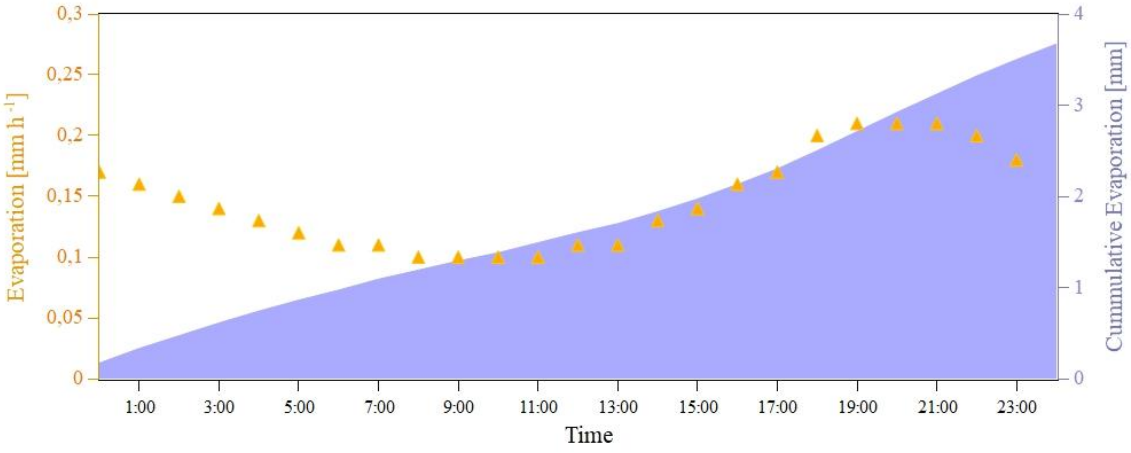
Παράμετρος	Τιμή
Μέση ταχύτητα αέρα, $u\ [m\ s^{-1}]$	0.5
Κινηματικό ιξώδες νερού, $\nu\ [m^2\ s^{-1}]$	$1.55 * 10^{-5}$
Μέση θερμοκρασία αέρα και νερού, $T_K[^oC]$	28.6
Συνολική πίεση, $P\ [bar]$	1
Συντελεστής διάχυσης νερού-αέρα $D_{water}[m^2\ s^{-1}]$	$2.7 * 10^{-5}$
Αριθμός Schmidt, $Sc\ [\ αδιάστατος]$	0.57
Αριθμός Sherwood, $Sh\ [αδιάστατος]$	8570
Συντελεστής μεταφοράς μάζας, $k_m\ [m\ s^{-1}]$	0.0015

Από το Διάγραμμα 9.7 φαίνεται η ωριαία μεταβολή της εξάτμισης για το Σενάριο 1 τον πιο ζεστό μήνα του χρόνου, δηλαδή του Ιουλίου. Πιο συγκεκριμένα, ο μέγιστος ρυθμός εξάτμισης παρατηρείται τις απογευματινές ώρες (19:00) και η τιμή του αντιστοιχεί $942.51\ kg\ h^{-1}$ ενώ η συνολική τιμή της εξάτμισης είναι $16.6\ tons\ d^{-1}$. Η προαναφερθείσα τιμή αντιστοιχεί σε συσσωρευτική εξάτμιση ίση με $0.21\ mm\ h^{-1}$ και συγκρίνοντας την με αντίστοιχες αναλύσεις παρόμοιων μονάδων οι τιμή βιβλιογραφικά ορθή σε σύγκριση με τους οι οποίοι για καλλιέργεια μικροφυκών υπολόγισαν εξάτμιση ίση με $0.31\ mm\ h^{-1}$ (Dias et al., 2025) . Το αριθμητικό αποτέλεσμα της χρονικής περιόδου της μέγιστης ωριαίας εξάτμισης οφείλεται στο ότι ο βιοαντιδραστήρας αποθηκεύει θερμότητα κατά τις ώρες υψηλής ακτινοβολίας το μεσημέρι και η θερμοκρασία του καλλιεργητικού μέσου συνεχίζει να είναι υψηλή και μετά την πτώση της ακτινοβολίας $(T_{pond} = 37^oC)$. Ως εκ τούτου, η διαφορά πυκνότητας είναι μεγαλύτερη και κατ' επέκταση και η παροχή εξάτμισης, ενώ στο Σενάριο 2 η μέγιστη εξάτμιση πραγματοποιείται κατά την ίδια χρονική περίοδο παίρνοντας όμως πολύ χαμηλότερη τιμή $(498.56\ kg\ h^{-1}\ )$ ενώ η συνολική ποσότητα εξάτμισης ανέρχεται στους $8.75\ tons\ d^{-1}$, αριθμός που αντιστοιχεί σε ίδια τιμή συσσωρετικής εξάτμισης $(0.21\ mm\ h^{-1})$. Όπως παρατηρείται παρά την μεγάλη διαφορά στην παροχή η συσσωρευτική εξάτμιση νερού παραμένει ωριαίως ίδια . Το αποτέλεσμα αυτό δικαιολογείται από την μεγάλη διαφορά στην επιφάνεια του αντιδραστήρα στα δύο διαφορετικά σενάρια (Διάγραμμα 9.8). Όπως παρατηρείται και στα δύο διαγράμματα κατά τις

νυχτερινές και πρωινές ώρες ο ρυθμός εξάτμισης μειώνεται παίρνοντας την ελάχιστη τιμή του $437.8\ kg\ h^{-1}$ για το Σενάριο 1 και $227.8\ kg\ h^{-1}$ για το Σενάριο 2.



Διάγραμμα 9.7: Ωριαία [kg h-1] και συσσωρευτική εξάτμιση νερού [kg] κατά την διάρκεια μία ημέρας του πιο ζεστού μήνα λειτουργίας για το Σενάριο 1



Διάγραμμα 9.8: Ωριαία και συσσωρευτική [mm h-1] εξάτμιση νερού [mm] κατα την διάρκεια μίας ημέρας του πιο ζεστού μήνα λειτουργίας για το Σενάριο 1.

9.5.2 Θρεπτικά συστατικά και παραγόμενη βιομάζα

Οι απαιτήσεις της καλλιέργειας σε θρεπτικά συστατικά υπολογίστηκαν με βάση τη στοιχειακή σύσταση της παραγόμενης ξηρής βιομάζας ως προς το άζωτο και τον φώσφορο (Πίνακας 13). Για το σενάριο 1, σε μόνιμη κατάσταση λειτουργίας θεωρήθηκε ότι η ποσότητα θρεπτικών που προστίθεται στο μέσο καλλιέργειας αντιστοιχεί ακριβώς στην ποσότητα που ενσωματώνεται στην ημερήσια παραγόμενη βιομάζα. Με τον τρόπο αυτό αποφεύγεται η συσσώρευση υπολειμματικών θρεπτικών στο ανακυκλούμενο υγρό μέσο. Η κάλυψη των αναγκών σε άζωτο και φώσφορο πραγματοποιείται

μέσω της προσθήκης θειικής αμμωνίας και υπερφωσφορικού λιπάσματος, αντίστοιχα, λαμβάνοντας υπόψη την περιεκτικότητα κάθε σκευάσματος στο αντίστοιχο θρεπτικό στοιχείο.

Η ημερήσια παραγωγή ξηρής βιομάζας υπολογίζεται από την εξίσωση 22:

$$\dot{m}_{biom,dry} = P_r \cdot A \tag{22}$$

όπου $\dot{m}_{biom,dry}$ είναι η ημερήσια παραγόμενη ξηρή βιομάζα [kg d^{-1}], P_r η επιφανειακή παραγωγικότητα [kg m^{-2} d^{-1}] και A η επιφάνεια της λίμνης [m^2].

Η απαιτούμενη ημερήσια ποσότητα σε θρεπτικά υπολογίζεται από την εξίσωση 23:

$$\dot{m}_{nutr} = \frac{\dot{m}_{biom,dry} \cdot w_{biom,nutr}}{w_{S,nutr}} \tag{23}$$

όπου $\dot{m}_{nutr}$ είναι η απαιτούμενη ποσότητα του κάθε θρεπτικού [kg d^{-1}] και $w_{S,nutr}$ η περιεκτικότητά κάθε λιπάσματος στο αντίστοιχο θρεπτικό.

Πίνακας 13: Περιεκτικότητα της βιομάζας και των θρεπτικών πηγών των δύο σεναρίων στα στοιχεία φωσφόρο και άζωτο.

	N [%]	P [%]
Βιομάζα	8.7	0.8
Σενάριο 1		
Υπερφωσφορικό	0	8.7
Θειική αμμωνία	21	0
Σενάριο 2		
Digestate	6.7	0.29

9.5.3 Προεπεξεργασία χωνεμένου υπολείμματος

Η προεπεξεργασία του digestate περιλαμβάνει δύο διαδοχικά στάδια μηχανικού διαχωρισμού, ένα screw press και έναν φυγοκεντρικό διαχωριστή τύπου decanter. Για τον προσδιορισμό της κατανομής της συνολικής παροχής μεταξύ των παραγόμενων υγρών και στερεών κλασμάτων χρησιμοποιήθηκαν ως βάση βιβλιογραφικά δεδομένα μονάδας μεγάλης κλίμακας επεξεργασίας χωνεμένου υπολείμματος προερχόμενου από αγροτοκτηνοτροφικά απόβλητα (Bolzonella et al., 2018) . Με δεδομένο την απαιτούμενη ημερήσια ποσότητα φωσφόρου στο ρεύμα εισόδου στον αντιδραστήρα (Decanter liquid), υπολογίστηκε η απαιτούμενη προς επεξεργασία παροχή digestate.

Πίνακας 14:Συγκεντρωτικός πίνακας ισοζυγίων μάζας της προεπεξεργασίας χωνεμένου υπολείμματος, όπου TN, total nitrogen, και TP, total phosphorus.

	$\dot{m}$ $[kg\ d^{-1}]$	TN $[kg\ d^{-1}]$	TP $[kg\ d^{-1}]$
Αρχική παροχή digestate	3192.8	21.39	0.93
Screw press liquid	2969.3	18.61	0.55
Screw press solid	223.5	2.78	0.31
Decanter liquid	2650.1	13.7	0.3
Decanter solid	319.3	3.42	0.38

9.5.4 Ισοζύγια μάζας συμπύκνωσης και τελικής ξήρανσης

9.5.4.1 Ισοζύγια μάζας φίλτρων

Μετά τον προσδιορισμό της παροχής εξόδου από τη λίμνη καλλιέργειας, το συγκεκριμένο ρεύμα οδηγείται στο πρώτο στάδιο συγκομιδής και αφυδάτωσης της βιομάζας.

Για το στάδιο αυτό τόσο η απόδοση ανάκτησης βιομάζας όσο και η μέγιστη επιτεύξιμη συγκέντρωση μετά τη διήθηση λαμβάνεται από τη βιβλιογραφία (Fasaei, Bitter, Slegers, & van Boxtel, 2018). Με εφαρμογή των επιμέρους και συνολικών ισοζυγίων μάζας υπολογίζονται οι παροχές βιομάζας και νερού στα δύο ρεύματα εξόδου και για τα δύο σενάρια (Πίνακας 15).

Πίνακας 15: Συγκεντρωτικός πίνακας παραμέτρων για το στάδιο των φίλτρων για τα δύο σενάρια

Παράμετρος	Τιμή
Απόδοση φίλτρου, $\dot{\eta}_F$ (αδιάστατος)	0.98 (Fasaei, Bitter, Slegers, & van Boxtel, 2018)
Συγκέντρωση βιομάζας εξόδου, X_{out} $[kg\ m^3]$	22 (Fasaei, Bitter, Slegers, & van Boxtel, 2018)
Ρεύμα εισόδου βιομάζας, $\dot{m}_{biomass,in}$ $[kg\ d^{-1}]$	37.0
Ρεύμα εισόδου νερού, $\dot{m}_{water,in}$ $[kg\ d^{-1}]$	74,038
Ρεύμα εξόδου βιομάζας, $\dot{m}_{biomass,out}$ $[kg\ d^{-1}]$	36.3
Ρεύμα εξόδου προς decanter, $\dot{m}_{w,out}[kg\ d^{-1}]$	1,650
Ρεύμα διηθήματος, $\dot{m}_{w,rec,filter}[kg\ d^{-1}]$	72,388

9.5.4.2 Ισοζύγια μάζας φυγοκεντριτή τύπου decanter

Μετά την προκαταρκτική συμπύκνωση της παραγόμενης βιομάζας, το ρεύμα που προκύπτει χρησιμοποιείται ως τροφοδοσία του φυγοκεντριτή τύπου decanter. Επομένως, ως αρχικά δεδομένα για την ανάπτυξη του ισοζυγίου μάζας θεωρούνται η συνολική παροχή του ρεύματος εξόδου των φίλτρων και η συγκέντρωση της βιομάζας σε αυτό.

Για τον προσδιορισμό των δύο ρευμάτων εξόδου απαιτείται στη συνέχεια η γνώση της απόδοσης ανάκτησης του φυγοκεντριτή (Fasaei, Bitter, Slegers, & van Boxtel, 2018) . Έτσι, προσδιορίζεται αρχικά η ποσότητα ξηρής βιομάζας που ανακτάται, ενώ το υπόλοιπο ποσοστό θεωρείται ότι χάνεται στο υγρό ρεύμα. Στην περίπτωση του σεναρίου 2 το υγρό ρεύμα τροφοδοτείται σε αναερόβιο χωνευτή ενώ στην περίπτωση των ανόργανων θρεπτικών συστατικών ανακυκλώνεται στην δεξαμενή αποθήκευσης μέσου για να τροφοδοτηθεί ξανά στον αντιδραστήρα.

Έχοντας υπολογίσει την ποσότητα βιομάζας που ανακτάται, χρησιμοποιείται η επιθυμητή τελική συγκέντρωση βιομάζας στην έξοδο για να προσδιοριστεί η συνολική παροχή του συμπυκνωμένου ρεύματος. Με τον τρόπο αυτό καθορίζεται το ρεύμα υψηλής περιεκτικότητας σε βιομάζα, το οποίο αποτελεί την τροφοδοσία του επόμενου σταδίου ξήρανσης (Fasaei, Bitter, Slegers, & van Boxtel, 2018) .

Πίνακας 16: Συγκεντρωτικός πίνακας ισοζυγίων μάζας φυγοκέντρου τύπου decanter.

Παράμετρος	Τιμή
Απόδοση φυγοκέντρου, η_D (αδιάστατος)	0.95 (Fasaei, Bitter, Slegers, & van Boxtel, 2018)

Ρεύμα εισόδου βιομάζας $\dot{M}_{biomass,in}\ [kg\ d^{-1}]$	36.3
Ρεύμα εισόδου νερού, $\dot{M}_{water,in}\ [kg\ d^{-1}]$	1,650
Ρεύμα εξόδου βιομάζας, $\dot{M}_{biomass,out}\ [kg\ d^{-1}]$	34.5
Ρεύμα εξόδου νερού, $\dot{M}_{water,out}\ [kg\ d^{-1}]$	139.0
Συγκέντρωση βιομάζας εξόδου, $X_{out}\ [kg\ d^{-1}]$	200 (Fasaei, Bitter, Slegers, & van Boxtel, 2018)

9.5.4.3 Ισοζύγια μάζας χώρου φυσικής εξάτμισης

Μετά και το δεύτερο στάδιο αφυδάτωσης του ρεύματος της βιομάζας το ρεύμα τροφοδοτείται στο τελικό στάδιο φυσικής ξήρανσης. Σκοπός του σταδίου αυτού είναι η περαιτέρω απομάκρυνση της υγρασίας και η παραγωγή ενός περισσότερο σταθερού και συμπυκνωμένου τελικού προϊόντος. Σε αντίθεση με τα προηγούμενα στάδια διαχωρισμού, κατά τη φυσική ξήρανση θεωρείται ότι δεν χάνεται ποσότητα βιομάζας και η μεταβολή της συνολικής μάζας οφείλεται αποκλειστικά στην απομάκρυνση νερού λόγω εξάτμισης. Επιπλέον, επιλέγεται το προς συγκομιδή υλικό να έχει ποσοστό υγρασίας ίσο με 8% κατά βάρος έτσι ώστε να μπορεί να προσεγγίζει παρόμοια σκευάσματα στην αγορά βιολιπασμάτων.

Πίνακας 17: Συγκεντρωτικός πίνακας ισοζυγίων μάζας χώρου φυσικής ξήρανσης (Agbede et al., 2020).

Παράμετρος	Υπολογίσιμη τιμή
Απόδοση εξάτμισης, $\dot{\eta_{ev}}$ (αδιάστατος)	0.95 (Agbede et al., 2020)
Ρεύμα εισόδου βιομάζας, $\dot{M}_{biomass,in}\ [kg\ d^{-1}]$	34.5
Ρεύμα εισόδου νερού, $\dot{M}_{water,in}\ [kg\ d^{-1}]$	138.9
Ρεύμα εξόδου βιομάζας, $\dot{M}_{biomass,out}\ [kg\ d^{-1}]$	34.5
Ρεύμα εξόδου νερού, $\dot{M}_{water,out}\ [kg\ d^{-1}]$	2.8
Ρεύμα εξάτμισης νερού, $\dot{M}_{water,out}\ [kg\ d^{-1}]$	136.2

9.6 ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΚΑΙ ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

9.6.1 Ισοζύγια ενέργειας αντιδραστήρα

Για την εκτίμηση της θερμικής συμπεριφοράς του βιοαντιδραστήρα διαμορφώθηκε δυναμικό ισοζύγιο ενέργειας στον υγρό όγκο της καλλιέργειας.

Οι κύριες παραδοχές για την ανάπτυξη του μοντέλου ήταν πως ο αντιδραστήρας λειτουργεί υπό συνθήκες πλήρους ανάδευσης και η συγκέντρωση της βιομάζας και των θρεπτικών συστατικών θεωρείται ομοιόμορφη σε όλο τον όγκο του. Με βάση την ίδια παραδοχή, η θερμοκρασία της καλλιέργειας θεωρείται χωρικά ομοιόμορφη και περιγράφεται από μία μέση θερμοκρασία, T_p ενώ οι φυσικές ιδιότητες του υγρού μέσου, θεωρούνται σταθερές και προσεγγίζονται με τις αντίστοιχες τιμές του νερού. Όσον αφορά την ακτινοβολία, όλες οι επιφάνειες που συμμετέχουν στην ανταλλαγή θερμικής ακτινοβολίας θεωρήθηκαν ως γκρίζες, διάχυτες επιφάνειες ενώ το βάθος της λίμνης τέθηκε επαρκές, ώστε η προσπίπτουσα ακτινοβολία από το περιβάλλον να απορροφάται πλήρως από την

καλλιέργεια πριν φτάσει στον πυθμένα (Béchet et al., 2011). Οι παρακάτω όροι του ισοζυγίου αντιστοιχούν στην εκπεμπόμενη ακτινοβολία από την επιφάνεια της λίμνης προς το περιβάλλον $(Q_{rad,pond})$, την συνολική εκπεμπόμενη ακτινοβολία δηλαδή άμεση και διάχυτη $(Q_{rad,sun})$, την ακτινοβολία από τον αέρα προς την λίμνη $(Q_{rad,air})$, την θερμική ροή λόγω εξάτμισης (Q_{ev}), την ενέργεια που μεταφέρεται λόγω συναγωγής της επιφάνειας της λίμνης και του αέρα (Q_{conv}), την θερμική ροή λόγω αγωγής του εδάφους στον πυθμένα του αντιδραστήρα (Q_{cond}), την θερμική ροή που σχετίζεται με την εισροή νερού κατά την εισαγωγή φρέσκου μέσου (Q_{in}), ενώ τέλος η θερμική ροή που προκαλείται από τη βροχή (Q_{rain}), που ωστόσο στα πλαίσια του παρόντος σχεδιασμού θεωρείται μηδενική αφού βιοαντιδραστήρα σχεδιάζεται εντός θερμοκηπίου.

Έτσι, το ολικό ισοζύγιο ενέργειας περιγράφεται από την παρακάτω διαφορική εξίσωση (Εξίσωση 24):

$$\rho_w V C_{p,w} \frac{dT_p}{dt} = Q_{rad,pond} + Q_{rad,sun} + Q_{rad,air} + Q_{ev} + Q_{conv} + Q_{cond} + Q_{in} + Q_{rain} \qquad (24)$$

Ξεκινώντας την ενεργειακή ανάλυση, η ελεύθερη επιφάνεια του καλλιεργητικού μέσου θεωρήθηκε ότι συμπεριφέρεται ως φαιό, διάχυτο ακτινοβολούν σώμα και όχι ως ιδανικό μέλαν σώμα (Εξίσωση 25). Η αντίστοιχη συνολική θερμική συνεισφορά της ακτινοβολίας προσδιορίστηκε με βάση τη συνολική προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία, στην οποία περιλαμβάνονται τόσο η άμεση όσο και η διάχυτη συνιστώσα.

Για τον υπολογισμό της συνολικής εκπεμπόμενης ακτινοβολίας απαιτείται η εισαγωγή της φωτοσυνθετικής απόδοσης f_a, που αποσκοπεί στον διαχωρισμό της προσπίπτουσας ηλιακής ενέργειας σε δύο διακριτές συνιστώσες. Ένα περιορισμένο μέρος αυτής δεσμεύεται φωτοχημικά από τα κύτταρα και αποθηκεύεται υπό μορφή χημικής ενέργειας στη βιομάζα, ενώ το υπόλοιπο ποσοστό θεωρείται διαθέσιμο για τη θερμική φόρτιση του καλλιεργητικού μέσου. Ωστόσο, για την ορθή περιγραφή του φαινομένου αυτού θα πρέπει τα διαθέσιμα δεδομένα ηλιακής ακτινοβολίας να διορθωθούν ως προς την διαπερατότητα του νάιλον του θερμοκηπίου (τ_c) κατά παράγοντα 0.7 ενώ ο παράγοντας I_A αντιπροσωπεύει την μέση εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία στο περιβάλλον του βιοαντιδραστήρα (Tiwari et al., 1998).

Η επιφάνεια της λίμνης, όμως, δέχεται και θερμική ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος από το περιβάλλον. Για τον υπολογισμό της θερμικής αυτής ροής θεωρήθηκε ότι το περιβάλλον της λίμνης μπορεί να προσεγγιστεί ως ένα ομοιόμορφο ακτινοβολούν σώμα με χαρακτηριστική θερμοκρασία ίση με τη θερμοκρασία του αέρα και μπορεί να προσεγγιστεί από την εξίσωση Stefan- Boltzmann. (Εξίσωση 27). Ο όρος ε_w αντιστοιχεί στο ποσοστό εκπομπής της ακτινοβολίας που δέχεται κάποιο σώμα και παίρνει τιμές από 0 μέχρι 1. Με αυτόν τον τρόπο περιγράφηκε η θερμική ροή λόγω ακτινοβολίας.

Για την ποσοτική περιγραφή της συναγωγικής ανταλλαγής θερμότητας μεταξύ της ελεύθερης επιφάνειας της λίμνης και του υπερκείμενου αέρα θεωρήθηκε ότι η συναγωγή λαμβάνει χώρα σε ολόκληρη την ελεύθερη επιφάνεια της λίμνης και ότι η ενεργός επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας ταυτίζεται με τη γεωμετρική επιφάνεια. Έτσι, ο όρος περιγράφει αποκλειστικά τη μεταφορά θερμότητας λόγω της θερμοκρασιακής διαφοράς μεταξύ νερού και αέρα $(T_{pond} - T_{air})$, ενώ η ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας h_{conv} εκφράζει την ένταση της θερμικής ανταλλαγής μεταξύ της επιφάνειας του αντιδραστήρα και του αέρα του θερμοκηπίου (Εξίσωση 28).

Αναντίρρητα, δεν θα πρέπει να παραλειφθεί η επίδραση της εξάτμισης του νερού από το συνολικό ενεργειακό ισοζύγιο. Πιο συγκεκριμένα, η εξάτμιση συνιστά ταυτόχρονα φαινόμενο μεταφοράς μάζας και ενέργειας, καθώς η μετάβαση του νερού από την υγρή στην αέρια φάση απαιτεί την παροχή λανθάνουσας θερμότητας (L_w) , η οποία αφαιρείται από το καλλιεργητικό μέσο. Στην διαδι-

κασία αυτή η αέρια φάση αντιμετωπίστηκε ως ιδανικό αέριο έτσι ώστε οι μερικές πιέσεις των υδρατμών να μετατραπούν άμεσα σε αντίστοιχες συγκεντρώσεις, ενώ η μαζική παροχή εξάτμισης m_e έχει υπολογιστεί από το κεφάλαιο των Ισοζυγίων Μάζας (Εξίσωση 29).

Η θερμική αλληλεπίδραση μεταξύ του περιβάλλοντος καλλιέργειας και του υποκείμενου εδάφους αποτελεί επιπλέον συνιστώσα του συνολικού ενεργειακού ισοζυγίου και πραγματοποιείται με μηχανισμό αγωγής κατά μήκος του πυθμένα της λίμνης με συντελεστή αγωγιμότητας k_s. Η κατεύθυνση της θερμικής ροής καθορίζεται από τη θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ του καλλιεργητικού μέσου και των βαθύτερων εδαφικών στρωμάτων, με αποτέλεσμα το έδαφος να δύναται να λειτουργεί είτε ως θερμικός αποδέκτης είτε ως θερμική πηγή. Για την περιγραφή του συγκεκριμένου μηχανισμού υιοθετήθηκε προσέγγιση ψευδομόνιμης κατάστασης θεωρώντας ότι η θερμοκρασιακή κατανομή στο έδαφος δεν παρουσιάζει ουσιώδη χρονική μεταβολή $\left(\frac{dT_s}{dt}(z,t)=0\right)$. Ως εκ τούτου, ο όρος συσσώρευσης θερμικής ενέργειας στο έδαφος θεωρείται αμελητέος λόγω της μεγάλης οριζόντιας έκτασης του αντιδραστήρα συγκριτικά με χαρακτηριστικό βάθος θερμικής διείσδυσης στο έδαφος. Για την απλοποίηση της πραγματικής θερμοκρασιακής κατανομής του εδάφους εισήχθη ένα χαρακτηριστικό βάθος αναφοράς l_s, πέραν του οποίου θεωρήθηκε ότι οι βραχυπρόθεσμες θερμοκρασιακές διακυμάνσεις της επιφάνειας έχουν πρακτικά αποσβεστεί (Εξίσωση 31). Στο βάθος αυτό αποδόθηκε μία σταθερή θερμοκρασία αναφοράς T_{ref}. ενώ η θερμοκρασία στη διεπιφάνεια μεταξύ πυθμένα και εδάφους προσεγγιστηκε από τη χαρακτηριστική θερμοκρασία του καλλιεργητικού μέσου T_p.

Ο τελικός όρος που συνεισφέρει στο συνολικό ενεργειακό ισοζύγιο αποτελεί η εισερχόμενη παροχή ρεύματος νερού για την αναπλήρωση του χαμένου όγκου λόγω συγκομιδής της βιομάζας και στα δύο σενάρια. Το εισερχόμενο υγρό ρεύμα διαφέρει θερμοκρασιακά από το καλλιεργητικό μέσο και για αυτό θα πρέπει να αποδοθεί όρος για αυτήν την μεταφορά ενέργειας (Εξίσωση 30). Κατά την είσοδο του στον αντιδραστήρα, το νερό αναμιγνύεται ταχύτατα με το καλλιεργητικό μέσο, χωρίς πρόσθετες θερμικές απώλειες προς το περιβάλλον κατά τη διαδικασία τροφοδοσίας.

$$Q_{rad,pond} = -\varepsilon_w \sigma T_p^4 A_m \tag{25}$$

$$Q_{rad,sun} = \tau_c (1 - f_a) \mathrm{I_A} A_m \tag{26}$$

$$Q_{rad,air} = -\varepsilon_w \sigma T_{air}^4 A_m \tag{27}$$

$$Q_{conv} = h_{conv} A_m \left(T_{pond} - T_{air}\right) \tag{28}$$

$$Q_{evap} = -m_{evap} L_w \tag{29}$$

$$Q_{cond} = k_s S \frac{dT_s}{dz}(z=0) \tag{30}$$

$$C_{p,s}\rho_s \frac{dT_s}{dt}(z,t) = k_s \frac{d^2T_s}{dz^2}(z,t) \tag{31}$$

$$l_s = 4400 a_s^{0.5} \tag{32}$$

$$Q_{in} = \rho_w C_{p,w} q_i \left(T_i - T_p\right) \tag{33}$$

Πίνακας 18: Συγκεντρωτικός πίνακας πορσμέτρων γισ το ολικό ισοζύγιο του θερμοκηπίου

Παράμετρος	Τιμή
Σταθερά Stefan-Boltzmann, $\sigma\ [W\ m^{-2}\ K^{-4}]$	$5.6 * 10^{-8}$
Εκπομπή του νερού στην ακτινοβολία, $\varepsilon_w[\alpha\delta\iota\acute{\alpha}\sigma\tau\alpha\tau o]$	0.97
Φωτοσυνθετική απόδοση $f_a[\alpha\delta\iota\acute{\alpha}\sigma\tau\alpha\tau o]$	0.05
Διαπερότητα νάιλον θερμοκηπίου, $\tau_c[\alpha\delta\iota\acute{\alpha}\sigma\tau\alpha\tau o]$	0.7
Μέση θερμοκρασία αέρα, $T_{air}[\ K]$	302.6
Συντελεστής μεταφοράς θερμότητας, $h_{conv}[W\ m^{-2}K^{-1}]$	1.468
Λανθάνουσα θερμότητά εξάτμισης, $L_w[kJ\ kg^{-1}]$	2450000 (Alavianghavanini et al., 2024)
Αγωγιμότητα εδάφους, $k_s[W\ m^{-1}K^{-1}]$	1.66
Θερμοχωρητικότητα εδάφους, $C_{p,s}[J\ kg^{-1}K^{-1}]$	1250
Πυκνότητα εδάφους, $\rho_s\ [kg\ m^{-3}]$	1900 (Abu-Hamdeh, 2003)
Θερμοκρασία αναφοράς, $T_{ref}\ [K]$	285
Συντελεστής θερμικής διάχυσης εδάφους, $\alpha_s\ [m^2s^{-1}]$	$7 * 10^{-7}$ (Abu-Hamdeh, 2003)
Μήκος εδάφους όπου η θερμοκρασία μένει σταθερή, $l_s[m]$	3.68
Παροχή ανανέωσης νερού, $q_i\ [m^3s^{-1}]$	0.002
Πυκνότητα νερού, $\rho_w\ [kg\ m^{-3}]$	1000
Θερμοκρασία φρέσκιας τροφοδοσίας, $T_i\ [K]$	293
Θερμοχωρητικότητα νερού $C_{p,w}[J\ kg^{-1}K^{-1}]$	4180

.

Η χρονική εξέλιξη της θερμοκρασίας του καλλιεργητικού μέσου προσδιορίστηκε από το συνολικό δυναμικό ενεργειακό ισοζύγιο της λίμνης. Δεδομένου ότι ο υγρός όγκος χαρακτηρίζεται από σημαντική θερμική χωρητικότητα, η θερμοκρασία του δεν θεωρείται ότι προσαρμόζεται στιγμιαία στις μεταβολές των εξωτερικών συνθηκών, αλλά εξαρτάται τόσο από την προηγούμενη θερμική του κατάσταση όσο και από το καθαρό θερμικό φορτίο που δέχεται κατά το εκάστοτε χρονικό διάστημα. Για τον λόγο αυτό, ο όρος συσσώρευσης ενέργειας διατηρήθηκε στο ενεργειακό ισοζύγιο ο οποίος εκφράζει το άθροισμα των θερμικών ροών που εισέρχονται και εξέρχονται από τον αντιδραστήρα. Για την αριθμητική επίλυση του μοντέλου εφαρμόστηκε ωριαία διακριτοποίηση με $\Delta t = 1\ h$ και η χρονική παράγωγος της θερμοκρασίας προσεγγίστηκε με την μέθοδο προωθημένης διαφοράς .

$$T_{pond}^{i} = T_{pond}^{i-1} + \frac{\Delta t Q_{total}^{i-1}}{\rho_w V_m C_{p,w}} \tag{34}$$

9.6.2 Ενεργειακά ισοζύγια θερμοκηπίου

Μετά τον προσδιορισμό των επιμέρους θερμικών ροών που υπεισέρχονται στο ενεργειακό ισοζύγιο του αντιδραστήρα, κρίθηκε απαραίτητη η επέκταση της θερμικής ανάλυσης στο σύνολο του θερμοκηπίου. Η ανάγκη αυτή απαιτείται διότι η λίμνη δεν αλληλεπιδρά άμεσα με το εξωτερικό περιβάλλον, αλλά βρίσκεται εντός ενός κλειστού καλλιεργητικού χώρου, ο οποίος παρεμβάλλεται μεταξύ του συστήματος καλλιέργειας και των εξωτερικών μετεωρολογικών συνθηκών. Ως αποτέλεσμα,

η θερμοκρασία του αέρα που χρησιμοποιείται στο ενεργειακό ισοζύγιο της λίμνης δεν αποτελεί ανεξάρτητη εξωτερική μεταβλητή, αλλά προκύπτει από τη συνολική θερμική συμπεριφορά του θερμοκηπίου.

Για τον λόγο αυτό, το θερμοκήπιο θεωρήθηκε ως διακριτός όγκος ελέγχου, θερμικά συζευγμένος με τη λίμνη. Οι δύο όγκοι ελέγχου αλληλεπιδρούν μέσω των μηχανισμών μεταφοράς θερμότητας που αναπτύσσονται στη διεπιφάνεια νερού–αέρα, ενώ το θερμοκήπιο ανταλλάσσει παράλληλα ενέργεια με το εξωτερικό περιβάλλον μέσω του καλύμματος και μέσω του συστήματος αερισμού. Στον συνολικό όρο των εισερχόμενων και εξερχόμενων ενεργειακών ροών περιλαμβάνονται οι ανταλλαγή θερμότητας μεταξύ του εσωτερικού και του εξωτερικού αέρα λόγω αερισμού (Q_{vent}), η ηλιακή ενεργειακή συνεισφορά που εισέρχεται μέσω του καλύμματος (Q_{cover}), οι ανταλλαγές θερμότητας μεταξύ του εσωτερικού αέρα και των επιφανειών του θερμοκηπίου $\left(Q_{solar,floor}\right)$, καθώς και η θερμική αλληλεπίδραση μεταξύ της λίμνης και του υπερκείμενου αέρα (Q_{conv}).

$$\rho_a V_g C_{p,a} \frac{dT_g}{dt} = Q_{solar,floor} + Q_{conv,p\to g} + Q_{vent} + Q_{cover} \tag{35}$$

Ιδιαίτερη προσοχή απαιτείται κατά τη σύζευξη του ενεργειακού ισοζυγίου της λίμνης με εκείνο του θερμοκηπίου. Οι θερμικές ροές που ανταλλάσσονται μεταξύ των δύο υποσυστημάτων αποτελούν εσωτερικές μεταφορές ενέργειας ως προς το συνολικό σύστημα λίμνης–θερμοκηπίου. Κατά συνέπεια, κάθε τέτοια θερμική ροή εμφανίζεται με ίσο μέτρο και αντίθετο πρόσημο στα δύο αντίστοιχα ισοζύγια, όπως στην περίπτωση της συναγωγής η οποία δεν θα χρειαστεί να επαναυπολογιστεί (Εξίσωση 36).

Η ανανέωση του αέρα στο εσωτερικό του θερμοκηπίου αποτελεί επιπλέον μηχανισμό ανταλλαγής ενέργειας με το εξωτερικό περιβάλλον. Η λειτουργία του συστήματος αερισμού προκαλεί συνεχή αντικατάσταση μέρους του εσωτερικού αέρα από εξωτερικό αέρα, με αποτέλεσμα τη μεταφορά αισθητής θερμότητας ανάλογα με τη διαφορά μεταξύ της εσωτερικής και της εξωτερικής θερμοκρασίας. Για τον προσδιορισμό της απαιτούμενης παροχής χρησιμοποιήθηκε ως βιβλιογραφικό σημείο αναφοράς η ειδική παροχή αερισμού ανά μονάδα επιφάνειας δαπέδου $\left(q_v = 0.0188 \frac{m^3}{m^2 s}\right)$ του θερμοκηπίου (Salazar & Rios, 2010) . Έτσι, υιοθετήθηκε σταθερή ειδικής παροχή ανά μονάδα επιφάνειας και έγινε αναγωγή στην συνολική παροχή σε όλη την επιφάνεια $(\dot{V_{vent}})$ του εξεταζόμενου θερμοκηπίου (Misra & Ghosh, 2017). Στον συγκεκριμένο υπολογισμό λαμβάνεται υπόψη αποκλειστικά η μεταφορά αισθητής θερμότητας λόγω της διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ του εξωτερικού και του εσωτερικού αέρα $(T_g - T_{out})$.

Επιπλέον, σημαντικός όρος του ενεργειακού ισοζυγίου του θερμοκηπίου αποτελεί η συνεισφορά της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στο τμήμα εδάφους και δεν καταλήγει στο υγρό ρεύμα του αντιδραστήρα αλλά στην επιφάνεια του εδάφους που βρίσκεται μέσα στο θερμοκήπιο. Στην συγκεκριμένη ανάλυση θεωρήθηκε πως το 60% της ηλιακής ακτινοβολίας που διαπερνά το κάλυμμα του θερμοκηπίου κατευθύνεται προς την εκτεθειμένη επιφάνεια του εδάφους και συμμετέχει στην θερμική φόρτιση του. Η χρήση της διαφοράς $A_{greeenhouse} - A_{pond}$ επιφάνειας εξασφαλίζει ότι στον συγκεκριμένο ενεργειακό όρο συμπεριλαμβάνεται αποκλειστικά η επιφάνεια του εδάφους που παραμένει εκτεθειμένη στην ηλιακή ακτινοβολία, ενώ η ακτινοβολία που προσπίπτει στην επιφάνεια της λίμνης αντιμετωπίζεται ανεξάρτητα στο αντίστοιχο ενεργειακό ισοζύγιο του αντιδραστήρα. Όμως θα πρέπει να σημειωθεί πως η ακτινοβολία διορθώνεται εκ νέου με την διαπερατότητα του θερμοκηπίου τ_c όπως στα ισοζύγια του αντιδραστήρα.

Η θερμική ανταλλαγή μεταξύ του εσωτερικού αέρα του θερμοκηπίου και του εξωτερικού περιβάλλοντος περιγράφηκε μέσω του συνολικού συντελεστή μεταφοράς θερμότητας ο οποίος περιλαμβάνει την αντίσταση λόγω συναγωγής του εξωτερικού αέρα, λόγω αγωγής του καλύμματος του θερμοκηπίου και λόγω συναγωγής του εσωτερικού αέρα (Εξίσωση 40) . Για τον υπολογισμό της πρώτης αντίστασης λήφθηκαν βιβλιογραφικά δεδομένα για την ταχύτητα του u_{air} στην περιοχή εγκατάστασης, ενώ για την τρίτη αντίσταση λήφθηκαν δεδομένα από την ταχύτητα του αέρα λόγω του συστήματος εξαέρωσης. Όπως φαίνεται από τον Πίνακα 19 οι δύο συντελεστές μεταφοράς θερμότητας λόγω συναγωγής h_{in} και h_{out} διαφέρουν αρκετά και το γεγονός αυτό οφείλεται στην μεγάλη διαφορά της μέσης ταχύτητα του ανέμου στο εσωτερικό λόγω του συστήματος εξαερισμού και στο εξωτερικό λόγω ταχύτητας του ανέμου (Meteoblue, 2026) .

$$Q_{conv,p\to g} = -h_{conv}A_m\left(T_{pond} - T_{air}\right) \tag{36}$$

$$\dot{Q_{vent}} = \rho_a C_{p,a}\dot{V}_{vent}\left(T_{out} - T_g\right) \tag{37}$$

$$\dot{Q}_{solar,floor} = 0.6\tau_c I_{max}\left(A_{greenhouse} - A_{pond}\right) \tag{38}$$

$$Q_{cover} = U_g A_g\left(T_g - T_{out}\right) \tag{39}$$

$$\frac{1}{U_g} = \frac{1}{h_{in}} + \frac{\delta}{k_g} + \frac{1}{h_{out}} \tag{40}$$

Λόγω της σχετικά μικρής θερμικής χωρητικότητας της αέριας φάσης σε σύγκριση με εκείνη του υγρού όγκου της καλλιέργειας, θεωρήθηκε ότι ο εσωτερικός αέρας προσαρμόζεται ταχέως στις μεταβολές των ενεργειακών ροών. Ως εκ τούτου, σε κάθε ωριαίο χρονικό βήμα το ενεργειακό ισοζύγιο του αέρα επιλύεται υπό συνθήκες ψευδομόνιμης κατάστασης, θέτοντας $\frac{dT_g}{dt} = 0$.

Πίνακας 19: Παράμετροι που λήφθηκαν υπόψιν για τα ενεργειακά ισοζύγια του θερμοκηπίου.

Παράμετρος	Τιμή
Ταχύτητα εξωτερικού ανέμου στην εγκατάσταση, $u_{air}[m\ s^{-1}]$	3.63
Συντελεστής μεταφοράς θερμότητας, $h_{conv}[W\ m^{-2}K]$	1.468
Πυκνότητα αέρα, $\rho_{air}[kg\ m^{-3}]$	1.18
Θερμοχωρητικότητα αέρα,$C_{p,air}$	1005
Παροχή αερισμού, $V_{vent}[\dot{m}^3 s^{-1}]$	60.33
Συνολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας, $U_g[W\ m^{-2}K^{-1}]$	0.67
Συντελεστής μεταφοράς θερμότητας εσωτερικού αέρα και θερμοκηπίου, $h_{in}[W\ m^{-2}K^{-1}]$	0.68
Θερμική αγωγιμότητα νάιλον θερμοκηπίου, $k_g[W\ m^{-1}K^{-1}]$	0.7

Συντελεστής μεταφοράς θερμότητας εξωτερικού αέρα και θερμοκηπίου, h_{out} $[W\ m^{-2}K^{-1}]$	45.7

Μετά τον προσδιορισμό των επιμέρους ενεργειακών ροών που συνθέτουν τα ισοζύγια του αντιδραστήρα και του θερμοκηπίου, η ανάλυση επεκτάθηκε στη χρονική περιγραφή της θερμικής συμπεριφοράς του συζευγμένου συστήματος. Η επέκταση αυτή κρίθηκε απαραίτητη, καθώς οι μετεωρολογικές συνθήκες που καθορίζουν τις ενεργειακές ανταλλαγές δεν παραμένουν σταθερές κατά τη διάρκεια της ημέρας.

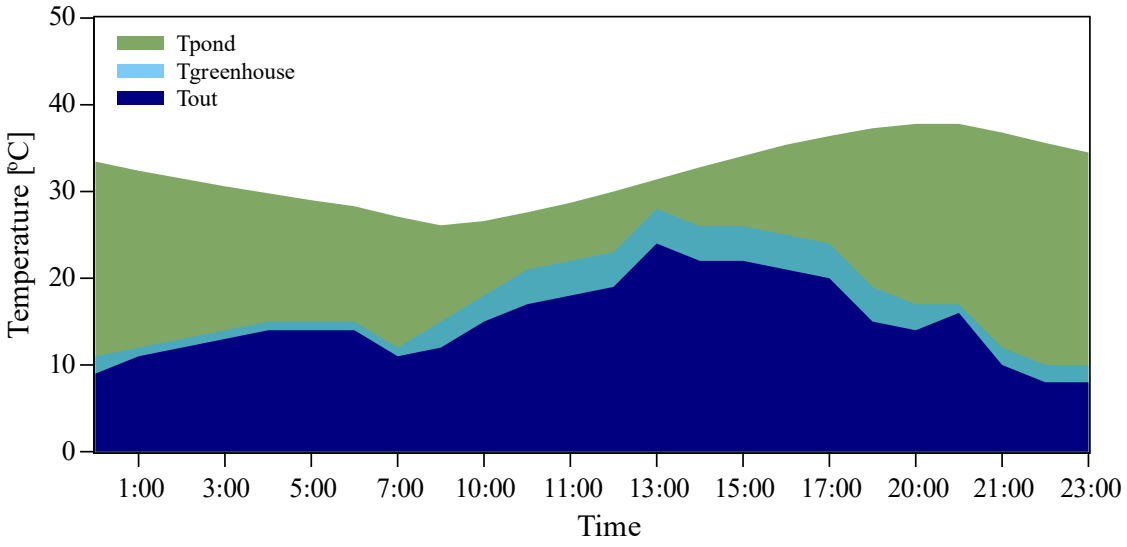
Η θερμική απόκριση των δύο υποσυστημάτων δεν θεωρήθηκε ταυτόσημη. Πιο συγκεκριμένα, ο υγρός όγκος της λίμνης παρουσιάζει αξιοσημείωτη θερμική αδράνεια και για αυτόν τον λόγο το ενεργειακό ισοζύγιο της λίμνης επιλύεται δυναμικά, λαμβάνοντας υπόψη τη συσσώρευση θερμικής ενέργειας στο καλλιεργητικό μέσο. Η θερμοκρασία του βιοαντιδραστήρα σε κάθε χρονικό βήμα εξαρτάται συνεπώς τόσο από την προηγούμενη θερμοκρασιακή της κατάσταση όσο και από το καθαρό θερμικό φορτίο που ασκείται σε αυτή και κατά το συγκεκριμένο χρονικό διάστημα φτάνει την μέγιστη τιμή των $37.9^{o}C$ τις απογευματινές ώρες ενώ η ελάχιστη θερμοκρασία λαμβάνει χώρα τις πρωινές ώρες και παίρνει την τιμή $27.6^{o}C$. Τα αριθμητικά αυτά αποτελέσματα πιστοποιούν την αργή και εξομαλυμένη θερμική απόκριση, λόγω της μεγαλύτερης θερμοχωρητικότητας του νερού (Διάγραμμα 9.9). Έτσι, περιορίζονται οι απότομες μεταβολές της θερμοκρασίας του βιοαντιδραστήρα και λειτουργεί ως θερμικός αποθηκευτικός όγκος. Κατά τις περιόδους αύξησης της θερμοκρασίας, η λίμνη απορροφά μέρος της διαθέσιμης θερμότητας, ενώ όταν ο αέρας του θερμοκηπίου ψύχεται, μπορεί να αποδίδει αποθηκευμένη θερμότητα προς το εσωτερικό περιβάλλον

Η θερμοκρασία του αέρα που προκύπτει από το ισοζύγιο του θερμοκηπίου (T_g) δεν αποτελεί ανεξάρτητο τελικό αποτέλεσμα, αλλά εισάγεται στη συνέχεια στο ενεργειακό ισοζύγιο του αντιδραστήρα. Η αλληλεπίδραση αυτή είναι ουσιώδης, καθώς η T_g επηρεάζει άμεσα τη συναγωγική ανταλλαγή θερμότητας μεταξύ αέρα και καλλιεργητικού μέσου, την ακτινοβολιακή ανταλλαγή, καθώς και της εξάτμισης (Εξίσωση 41).

$$T_g = \frac{Q_{solar,floor} + hA_pT_p + \left(\rho_a C_{p,a}\dot{V}_{vent} + U_g A_g\right)T_{out}}{hA_p + \rho_a C_{p,a}\dot{V}_{vent} + U_g A_g} \tag{41}$$

Εν αντιθέσει με την περίπτωση του αντιδραστήρα ο εσωτερικός αέρας του θερμοκηπίου ακολουθεί την θερμοκρασιακή διακύμανση του εξωτερικού περιβάλλοντος και έχει παρόμοια συμπεριφορά με την θερμοκρασία του εξωτερικού περιβάλλοντος. Έτσι, λαμβάνει μέγιστη τιμή $29^{o}C$ σε σχέση με την τιμή των $24^{o}C$ του εξωτερικού αέρα και ελάχιστη $13^{o}C$ σε σχέση με την τιμή των $11^{o}C$. Τα αποτελέσματα αυτά πιστοποιούν την θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ εσωτερικού και εξωτερικού αέρα που επισημάνθηκαν στον θεωρητικό μέρος.

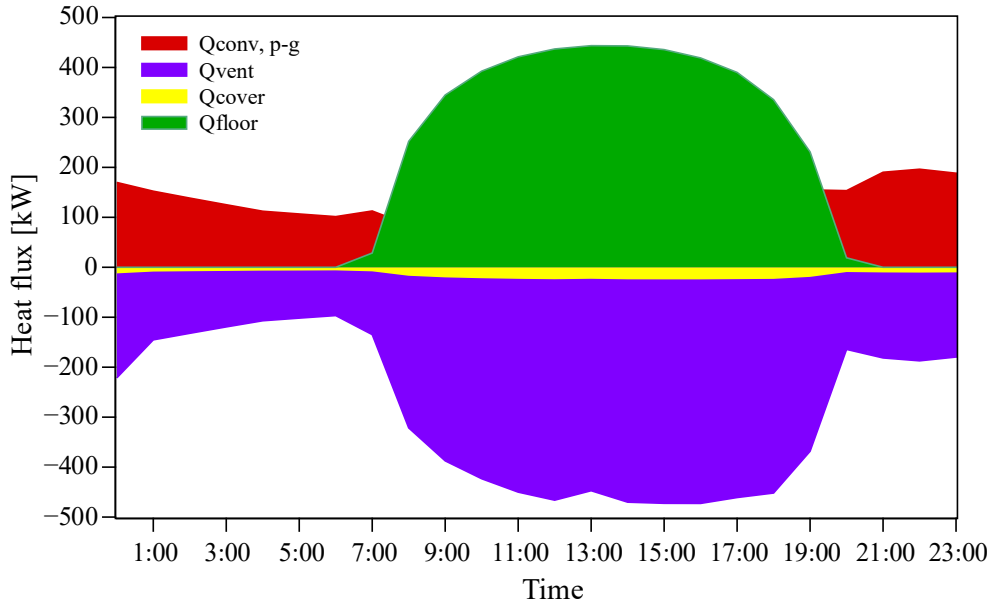
.



Διάγραμμα 9.9: Ωριαία θερμοκρασιακή μεταβολή της θερμοκρασίας του καλλιεργητικού μέσου και του θερμοκηπίου.

Για τη συνολική αποτύπωση της θερμικής συμπεριφοράς της μονάδας καταστρώθηκαν συγκεντρωτικά διαγράμματα των επιμέρους όρων των ενεργειακών ισοζυγίων του θερμοκηπίου (Διάγραμμα 9.10) και του αντιδραστήρα (Διάγραμμα 9.11) καλλιέργειας σε ωριαία βάση. Η γραφική αυτή απεικόνιση επιτρέπει την σύγκριση των μηχανισμών μεταφοράς θερμότητας και την αξιολόγηση της σχετικής συνεισφοράς τους κατά τη διάρκεια ενός πλήρους ημερήσιου κύκλου. Οι θετικές τιμές αντιστοιχούν σε θερμικά οφέλη του εξεταζόμενου συστήματος, ενώ οι αρνητικές σε θερμικές απώλειες προς το περιβάλλον. Με τον τρόπο αυτό καθίσταται δυνατός ο εντοπισμός των χρονικών περιόδων κατά τις οποίες επικρατούν συνθήκες καθαρής θέρμανσης ή ψύξης, καθώς και των μηχανισμών που διαδραματίζουν τον σημαντικότερο ρόλο στη διαμόρφωση του συνολικού ενεργειακού ισοζυγίου.

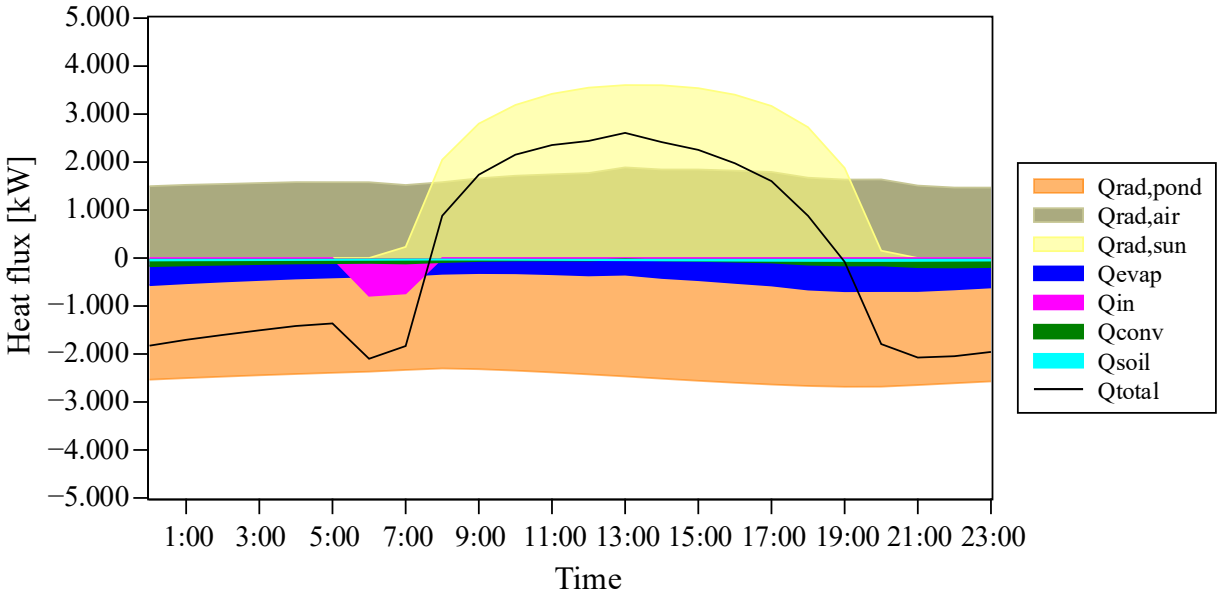
Τα αποτελέσματα του διαγράμματος των ενεργειακών ισοζυγίων του θερμοκηπίου απεικονίζουν πως κατά τις πρώτες πρωινές ώρες εν απουσία της ηλιακής ακτινοβολίας οι θερμικές ροές είναι περιορισμένες καθώς το θερμοκήπιο δεν έχει προλάβει να θερμανθεί καλά. Ωστόσο, με την παρουσία της ηλιακής ακτινοβολίας παρατηρείται τεράστια αύξηση της θερμικής ροής λόγω αγωγής του εδάφους φτάνοντας την τιμή των $383\ kW$. Η υψηλή αυτή τιμή οφείλεται στην αύξηση της θερμοκρασιακής διαφοράς μεταξύ εδάφους και καλλιεργητικού μέσου. Αντίστοιχα παρόμοια μορφή ακολουθείται και στην θερμική ροή λόγω αερισμού (Q_{vent}) η οποία παίρνει μέγιστο τιμή κατά μέτρο $402\ kW$. Και σε αυτήν την περίπτωση η ραγδαία αύξηση οφείλεται στην θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ εσωτερικού και εξωτερικού αέρα. Η ίδια μεταβολή όμως δεν παρατηρείται και στην θερμική ροή λόγω του καλύμματος του θερμοκηπίου (μέγιστη τιμή $26kW$) και αυτό συμβαίνει γιατί ο όρος V_{vent} έχει πολύ μεγαλύτερη επίδραση σε σχέση με τον όρο της συνολικής αντίστασης μεταφοράς θερμότητας U_g. Αντίστοιχα, η θερμική ροή συναγωγής είναι πιο ομαλή κατά την διάρκεια της ημέρας λόγω της μεγάλης θερμικής αδράνειας του καλλιεργητικού μέσου φτάνοντας την μέγιστη τιμή των $103\ kW$. Το γεγονός αυτό οφείλεται αργή θερμοκρασιακή μεταβολή του καλλιεργητικού μέσου σε σχέση με την θερμοκρασία του αέρα.



Διάγραμμα 9.10: Σχηματική απεικόνιση του ενεργειακού ισοζυγίου του θερμοκηπίου.

Αντίθετα, το συνολικό ενεργειακό ισοζύγιο του βιοαντιδραστήρα χαρακτηρίζεται από έντονη ημερήσια εναλλαγή μεταξύ περιόδων καθαρής θερμικής φόρτισης και ψύξης . Αρχικά, ο βιοαντιδραστήρας χάνει αρκετή ενέργεια μέσω της ακτινοβολίας που εκπέμπει η επιφάνεια της φτάνοντας την μέγιστη τιμή κατά τις μεσημβρινές ώρες $(2352\ kW)$. Ωστόσο, η τεράστια αυτή απώλεια αντισταθμίζεται με την θερμική ακτινοβολία του αέρα του θερμοκηπίου $Q_{rad,air}$ όπου φτάνει την μέγιστη τιμή των $1660\ kW$. Κατά τις νυχτερινές ώρες εν απουσία της ηλιακής ακτινοβολίας η συνολική θερμική ροή του αντιδραστήρα είναι αρνητική λόγω της διαφοράς των δύο κύριων θερμικών ροών που αναλύθηκαν παραπάνω. Μετά την ανατολή του ηλίου, η κατάσταση αντιστρέφεται καθώς η απορροφούμενη ηλιακή ακτινοβολία $Q_{rad,sun}$ αυξάνεται έντονα και γίνεται η κυρίαρχη θετική συνεισφορά φτάνοντας στα μέγιστα επίπεδα $(3113\ kW)$. Ως εκ τούτου, η συνολική ενεργειακή εισροή γίνεται θετική μίας και οι όροι συναγωγής $(Q_{conv,p\to g})$ και αγωγής μεταξύ εδάφους και καλλιεργητικού μέσου (Q_{soil}) είναι πολύ μικρότερη συγκριτικά με τις θερμικές ροές λόγω ακτινοβολίας. Οι μέγιστες τιμές αυτών των παραμέτρων είναι $174\ \kappa\alpha\iota\ 55\ kW$ αντίστοιχα.

Καθώς όμως αυξάνεται η θερμοκρασία του νερού ενισχύονται οι μηχανισμοί απώλειας λόγω εξάτμισης και ο αντιδραστήρας εμφανίζει μία μορφή αρνητικής θερμικής ανάδρασης όπου όσο περισσότερο θερμαίνεται αντιδραστήρας τόσο μεγαλύτερα φαινόμενα εξάτμισης πραγματοποιούνται. $(Q_{evap,max} = -641kW)$. Μετά τη δύση του ηλίου, η ηλιακή συνεισφορά μηδενίζεται και το ενεργειακό ισοζύγιο καθίσταται εκ νέου αρνητικό $(Q_{total} = -130kW)$, με τη λίμνη να αποδίδει σταδιακά την αποθηκευμένη θερμική ενέργεια μέσω ακτινοβολίας, εξάτμισης και συναγωγής.



Διάγραμμα 9.11: Ενεργειακό ισοζύγιο και κύριες θερμικές ροές του αντιδραστήρα

9.7 ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΥ

9.7.1 Σχεδιασμός πτερυγίου του βιοαντιδραστήρα

Η συνεχής ανάδευση του καλλιεργητικού μέσου αποτελεί βασική λειτουργική απαίτηση, καθώς εξασφαλίζει την κυκλοφορία της καλλιέργειας κατά μήκος του καναλιού, περιορίζει την καθίζηση της βιομάζας και συμβάλλει στην ομοιόμορφη κατανομή των θρεπτικών συστατικών και της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Η διαδικασία διαστασιολόγησης του πτερυγίου αποσκοπεί στον προσδιορισμό της απαιτούμενης υδραυλικής και μηχανικής ισχύος του συστήματος ανάδευσης, ώστε να είναι δυνατή η μετέπειτα επιλογή κατάλληλου πτερυγίου και κινητήρα. Για τον υπολογισμό αυτό εκτιμήθηκε το συνολικό υδραυλικό φορτίο λόγω τοπικών απωλειών στις καμπές του αντιδραστήρα καθώς και γραμμικών απωλειών τριβής. Ιδιαίτερη σημασία στην παραπάνω διαδικασία έχει η επιλογή της ταχύτητας κυκλοφορίας καθώς τόσο οι τοπικές όσο και οι γραμμικές υδραυλικές εξαρτώνται πλήρως από αυτές (Εξίσωση 43, 44) (Cunha et al., 2020).

$$W_p = 1.2 * 10^{-5} \xi \left(\frac{\rho F_{p,in} h}{e} \right) \tag{42}$$

$$h = h_b + h_c + h_s \tag{43}$$

$$h_b = \frac{K u^2}{2g} \tag{44}$$

$$h_c = u^2 \beta^2 \left(\frac{L}{r^{\frac{4}{3}}} \right), r = \frac{L_{pond} W_{pond}}{W_{pond} + 2H} \tag{45}$$

Για την επιλογή του είδους του πτερυγίου η βέλτιστη επιλογή είναι το τελευταίο να αποτελείται από 8 λεπίδες ($N_{blades} = 8$) . Η επιλογή αυτή έγινε διότι η αυξημένη συχνότητα επαφής των λεπίδων με το υγρό συμβάλλει στη διατήρηση σταθερότερης κυκλοφορίας κατά μήκος του καναλιού, περιορίζοντας την εμφάνιση περιοχών χαμηλής ταχύτητας και ευνοώντας την παραμονή της βιομάζας σε αιώρηση. Παράλληλα, η συγκεκριμένη διάταξη μπορεί να διευκολύνει την επίτευξη της επιθυμητής ταχύτητας ροής χωρίς την ανάγκη ιδιαίτερα υψηλής ταχύτητας περιστροφής, γεγονός που είναι ευνοϊκό ως προς τον περιορισμό έντονων τοπικών διατμητικών καταπονήσεων (Ren et al., 2025).

Αναφορικά με τις διαστάσεις του πτερυγίου θεωρήθηκε ότι το μήκος βύθισης του πτερυγίου θα είναι το 50% του λειτουργικού βάθους της λιμνης (Sawant et al., 2019). Η επιλογή αυτή επιτρέπει στις λεπίδες να μεταφέρουν επαρκή ποσότητα ορμής στο υγρό, χωρίς να απαιτείται η πλήρης βύθιση του πτερυγίου, η οποία θα αύξανε την υδραυλική αντίσταση και τις ενεργειακές απαιτήσεις του συστήματος (Sawant et al., 2019).

$$D_{paddlewheel} = N_{blades} H_{paddlewheel} \tag{46}$$

Για τον προσδιορισμό των λειτουργικών χαρακτηριστικών του πτερυγίου εκτιμήθηκε αρχικά η περιφερειακή ταχύτητα των λεπίδων. Θεωρήθηκε ότι η μέση ταχύτητα κυκλοφορίας του καλλιεργητικού μέσου αντιστοιχεί περίπου στο 80% της γραμμικής ταχύτητας του πτερυγίου, ώστε να λαμβάνονται υπόψη οι υδραυλικές απώλειες και η μη ιδανική μεταφορά κινητικής ενέργειας από τις λεπίδες προς το υγρό. Συνεπώς, η απαιτούμενη γραμμική ταχύτητα του πτερυγίου προσδιορίστηκε από την επιλεγμένη ταχύτητα ροής μέσω του αντίστοιχου συντελεστή μεταφοράς.

Έχοντας υπολογίσει την γραμμική ταχύτητα του πτερυγίου μπορούμε με εύκολο τρόπο να υπολογίσουμε την απαιτούμενη ταχύτητα περιστροφής από την Εξίσωση 47:

$$N_{paddlewheel}[rpm] = \frac{60 u_t}{\pi D_{paddlewheel}} \tag{47}$$

Πίνακας 20:Γεωμετρικές παράμετροι σχεδιασμού πτερυγίου ανάδευσης βιοαντιδραστήρα

Παράμετρος	Τιμή	
	Σενάριο 1	Σενάριο 2
Ισχύς πτερυγίου, W_p (kW)	1.01	2.38
Διάμετρος πτερυγίου, $D_{paddlewheel}$ (m)	0.72	1.2
Αριθμός περιστροφών, N $[rpm]$	9.95	5.97

9.7.2 Σχεδιασμός δεξαμενών αποθήκευσης

Οι δεξαμενές αποθήκευσης του μέσου και για τα δύο διαφορετικά σενάρια και του χωνεμένου υπολείμματος για το Σενάριο 2 διαστασιολογήθηκαν προκαταρκτικά με βάση την ημερήσια απαίτηση αναπλήρωσης του όγκου καλλιέργειας που απομακρύνεται από τη λίμνη και τροφοδοτείται στο Screw press αντίστοιχα. Δεδομένου ότι η λειτουργία της λίμνης θεωρείται ότι πραγματοποιείται υπό σταθερό όγκο, η ποσότητα που απομακρύνεται πρέπει να αντικαθίσταται από αντίστοιχη ποσότητα φρέσκου καλλιεργητικού μέσου. Κατά συνέπεια, ως βασική απαίτηση σχεδιασμού της δεξαμενής θεωρήθηκε η δυνατότητα αποθήκευσης τουλάχιστον της ποσότητας που απαιτείται για μία πλήρη ημέρα λειτουργίας.

Για λόγους προκαταρκτικού σχεδιασμού θεωρήθηκε κατακόρυφη κυλινδρική δεξαμενή, ώστε η τελική γεωμετρία να παραμένει εντός ρεαλιστικών ορίων εγκατάστασης. Επιπλέον, δεν θεωρήθηκε σκόπιμη η πλήρης αξιοποίηση του γεωμετρικού όγκου της δεξαμενής, αλλά προβλέφθηκε ελεύθερος όγκος ασφαλείας για την αποφυγή υπερχείλισης και τη διευκόλυνση της λειτουργίας κατά την παρασκευή, ανάδευση και τροφοδοσία του μέσου (Πίνακας 21).

Πίνακας 21:Συγκεντρωτικά αποτελέσματα σχεδιασμού δεξαμενής αποθήκευσης χωνεμένου υπολείμματος και νερού

	Δεξαμενή χωνεμένου υπολείμματος	Δεξαμενή προσθήκης θρεπτικού μέσου	
	Σενάριο 2	Σενάριο 1	Σενάριο 2
Διάμετρος δεξαμενής, $D_{tank}\ (m)$	1.38	2.24	2.10
Ύψος δεξαμενής, $H_{tank}\ (m)$	3.0	3.0	3.0
Όγκος δεξαμενής, $V_{tank}\ (m^3)$	4.47	11.9	10.4

9.7.3 Σχεδιασμός αντλιών

Η διαστασιολόγηση των αντλιών που χρησιμοποιούνται και στα δύο σενάρια πραγματοποιήθηκε με βάση τις απαιτούμενες παροχές των επιμέρους ρευμάτων και τις υδραυλικές αντιστάσεις που αναπτύσσονται κατά τη μεταφορά τους. Κάθε αντλία εξετάστηκε ανεξάρτητα, καθώς οι παροχές και τα χαρακτηριστικά των μεταφερόμενων ρευμάτων διαφοροποιούνται κατά μήκος της γραμμής επεξεργασίας. Στη συνέχεια επιλέχθηκε προκαταρκτικά η διάμετρος του αγωγού μεταφοράς D_{pipe} , με βάση μία κατάλληλη ταχύτητα ροής u_{feed} για το εκάστοτε ρεύμα. Ακολούθησε ο χαρακτηρισμός του καθεστώτος ροής μέσω του αριθμού Reynolds καθώς και ο προσδιορισμός του κατάλληλου συντελεστή τριβής f για τον οποίο θεωρήθηκε πως ο σωλήνας είναι κατασκευασμένος από γαλβανισμένο σίδηρο. Σημαντική συνεισφορά, όμως είχαν οι τοπικές απώλειες που προκαλούνται από την παρουσία εξαρτημάτων της σωλήνωσης οι οποίες υπολογίζονται βάσει της σταθεράς απώλειας λόγω της κίνησης (K_{loc}).

$$D_{pipe} = \sqrt{\frac{2Q_{in}}{\pi}} \tag{48}$$

$$u_{feed} = \frac{4Q_{in}}{\pi D_{pipe}^2} \tag{49}$$

$$h_f = \frac{f\left(\frac{L}{D_{pipe}}\right)u_{feed}^2}{2g} \tag{50}$$

$$f = \frac{0.25}{log\left(\frac{\varepsilon}{3.7D_{pipe}} + 5.74Re_D^{-0.9}\right)^2} \tag{51}$$

$$h_{loc} = K_{loc}\frac{u_{feed}^2}{2g} \tag{52}$$

Ιδιαίτερη αντιμετώπιση εφαρμόστηκε στην αντλία τροφοδοσίας της λίμνης, καθώς η διαθέσιμη στάθμη του υγρού στη δεξαμενή μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια της εκκένωσής της. Για τον λόγο αυτό το δυναμικό μανομετρικό ύψος δεν θεωρήθηκε σταθερό, αλλά υπολογίστηκε σε διαδοχικές

στάθμες υγρού. Στο υπολογιστικό μοντέλο η στάθμη μεταβλήθηκε βαθμιαία και για κάθε επιμέρους κατάσταση επαναπροσδιορίστηκε η υψομετρική απαίτηση της αντλίας. Ως κρίσιμη τιμή σχεδιασμού χρησιμοποιήθηκε το μέγιστο συνολικό δυναμικό μανομετρικό ύψος H_{tot}, το οποίο αντιστοιχεί στη δυσμενέστερη κατάσταση λειτουργίας της αντλίας. Με τον τρόπο αυτό η αντλία διαστασιολογείται ώστε να μπορεί να καλύψει το σύνολο του κύκλου τροφοδοσίας και όχι μόνο την αρχική κατάσταση υψηλής στάθμης.

$$P_h = \rho g Q H_{tot} \tag{53}$$

Για τον υπολογισμό της απαιτούμενης ισχύος των αντλιών κρίθηκε αρχικά απαραίτητη η εκτίμηση του βαθμού απόδοσής τους η_p. Δεδομένου ότι στο παρόν στάδιο πραγματοποιείται προκαταρκτικός σχεδιασμός και δεν έχει επιλεγεί συγκεκριμένο εμπορικό μοντέλο αντλίας, η απόδοση εκτιμήθηκε συναρτήσει της ογκομετρικής παροχής (Seider et al., 2009).

$$\eta_P = -0.316 + 0.24015\, ln\, Q - 0.01199(ln\, Q)^2 \tag{54}$$

$$P_{\text{pump}} = \frac{P_h}{\eta_P} \tag{55}$$

Καθώς ο βαθμός απόδοσης είναι μικρότερος της μονάδας, η απαιτούμενη ισχύς της πραγματικής αντλίας είναι υψηλότερη από την υδραυλική ισχύ που μεταδίδεται στο ρευστό. Η παραπάνω διαδικασία εφαρμόστηκε ξεχωριστά για κάθε αντλία της εγκατάστασης στην περίπτωση των δύο σεναρίων, χρησιμοποιώντας την αντίστοιχη παροχή, πυκνότητα και συνολικό μανομετρικό ύψος, ώστε να προσδιοριστεί η απαιτούμενη ισχύς λειτουργίας υπό τις εκάστοτε συνθήκες σχεδιασμού (Πίνακας 22).

Πίνακας 22: Συγκεντρωτικός πίνακας σχεδιασμού αντλιών για τα δύο σενάρια

Εξοπλισμός	Ισχύς (kW)
Σενάριο 1	
Αντλία τροφοδοσίας αντιδραστήρα	0.29
Αντλία τροφοδοσίας φίλτρων	0.13
Αντλία τροφοδοσίας φυγοκέντρου ξήρανσης	0.003
Αντλία ανακυκλοφορίας	3.28
Σενάριο 2	
Αντλία τροφοδοσίας screw press	0.003
Αντλία τροφοδοσίας φυγοκέντρου προεπεξεργασίας	0.005
Αντλία τροφοδοσίας δεξαμενής μέσου	0.004
Αντλία νερού προς δεξαμενή μέσου	1.06
Αντλία τροφοδοσίας αντιδραστήρα	0.29
Αντλία τροφοδοσίας φίλτρων	0.12
Αντλία τροφοδοσίας φυγοκέντρου ξήρανσης	0.003

9.7.4 Σχεδιασμός φίλτρων

Η βασική παράμετρος για τον προσδιορισμό της απαιτούμενης επιφάνειας των φίλτρων είναι η επιφανειακή ροή διηθήματος J, η οποία εκφράζει τον όγκο του διηθήματος που μπορεί να παραχθεί ανά μονάδα ενεργού επιφάνειας μεμβράνης και ανά μονάδα χρόνου (Castro-Muñoz & García-

Depraect, 2021). Για δεδομένη απαιτούμενη παροχή διηθήματος Q_p, η συνολική ενεργός επιφάνεια προσδιορίζεται:

$$A_{filter} = \frac{Q_p}{J} \tag{56}$$

Πίνακας 23: Πίνακας αποτελεσμάτων σχεδιασμού φίλτρων.

Παράμετρος	Τιμή	
	Σενάριο 1	Σενάριο 2
Επιφάνεια φίλτρου, A_{filter} (m^2)	81.3	67.9

9.7.5 Σχεδιασμός φυγοκέντρου τύπου decanter

Όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα στην αναλυτική περιγραφή του διαγράμματος ροής, έχει χρησιμοποιηθεί φυγόκεντρος τύπου decanter τόσο στο στάδιο της προεπεξεργασίας του digestate για την περίπτωση του σεναρίου 2 όσο και στο στάδιο ξήρανσης της βιομάζας και για τα δύο σενάρια. Για τον σχεδιασμό της φυγοκέντρου τύπου decanter εφαρμόστηκε μεθοδολογία βασισμένη στη φυγοκεντρική καθίζηση των σωματιδίων της βιομάζας. Ως αφετηρία του υπολογισμού χρησιμοποιήθηκε η χαρακτηριστική ταχύτητα καθίζησης u_g κατά Stokes, η οποία προσδιορίστηκε λαμβάνοντας υπόψη τις φυσικές ιδιότητες της στερεής και της υγρής φάσης, καθώς και την αντιπροσωπευτική διάμετρο των αιωρούμενων σωματιδίων D_{pc} . Για την εφαρμογή αυτή, θεωρήθηκε ότι τα σωματίδια της βιομάζας είναι σφαιρικά και ότι η σχετική κίνησή τους ως προς την υγρή φάση πραγματοποιείται σε καθεστώς ροής στο οποίο η συγκεκριμένη προσέγγιση παραμένει εφαρμόσιμη (Belohlav & Jirout, 2019).

Οι βασικές γεωμετρικές διαστάσεις της φυγοκέντρου decanter επιλέχθηκαν σε προκαταρκτικό επίπεδο με βάση γεωμετρικά παρόμοιο βιομηχανικό εξοπλισμό (Belohlav & Jirout, 2019) . Συγκεκριμένα θεωρήθηκε εξωτερική ακτίνα τυμπάνου $R_{dr} = 0.28m$, ακτίνα της ενεργού περιοχής υγρού $R_w = 0.224m$ ενώ το συνολικό ενεργό μήκος του κυλίνδρου και του κώνου επιλέχθηκε $L_1 = 0.7m$ και $L_2 = 0.42m$ αντίστοιχα.

Ακολούθως, η υπολογισθείσα ταχύτητα καθίζησης συνδυάστηκε με την απαιτούμενη παροχή τροφοδοσίας της υπό μελέτη μονάδας, προκειμένου να προσδιοριστεί ο απαιτούμενος παράγοντας Σ. Ο παράγοντας αυτός εκφράζει την ισοδύναμη επιφάνεια καθίζησης της φυγοκέντρου και αποτελεί μέτρο της ικανότητας του εξοπλισμού να επιτυγχάνει τον επιθυμητό διαχωρισμό για δεδομένη παροχή και χαρακτηριστική ταχύτητα καθίζησης. Εν συνεχεία, υπολογίστηκε η γεωμετρική σχέση που συνδέει τον παράγοντα αυτό με τις διαστάσεις του τυμπάνου και τη γωνιακή ταχύτητα περιστροφής. Δεδομένου ότι η εξωτερική ακτίνα και το ενεργό μήκος είχαν ήδη καθοριστεί, η γωνιακή ταχύτητα αποτέλεσε την κύρια άγνωστη μεταβλητή του προβλήματος. Τέλος, η τιμή της γωνιακής ταχύτητας μετατράπηκε στην απαιτούμενη ταχύτητα περιστροφής της φυγοκέντρου (Εξίσωση 62).

$$u_g[m\ s^{-1}] = \frac{D_{pc}^2(\rho_{biomass} - \rho_{water})g}{18\mu} \tag{57}$$

$$F_{in}[m^3\ h^{-1}] = 2u_g\Sigma_{decanter} \tag{58}$$

$$\Sigma_{decanter} = \frac{\omega^2 \pi}{g} L_1\left(1.5R_{dr}^2 + 0.5R_w^2\right) + L_2\left(0.25R_{dr}^2 + 0.75R_{dr}R_w + R_w^2\right) \quad (59)$$

$$R_w = 0.8R_{dr} \quad (60)$$

$$L_2 = 0.6L_1 \quad (61)$$

$$N_{decanter}[rpm] = \frac{60\omega}{2\pi} \quad (62)$$

Στον Πίνακα 24 αποτυπώνονται όλες οι σχεδιαστικές παράμετροι της φυγοκέντρου τύπου decanter για το στάδιο της ξήρανσης της βιομάζας και της προεπεξεργασίας του χωνεμένου υπολείμματος:

Πίνακας 24:Σχεδιαστικές παράμετροι φυγοκέντρου τύπου decanter για την ξήρανση της βιομάζας και την προεπεξεργασία του digestate

Παράμετρος	Τιμή		
Στάδιο φυγοκέντρισης	Προεπεξεργασία	Ξήρανση	
	Σενάριο 2	Σενάριο 1	Σενάριο 2
Κρίσιμη διάμετρος σωματιδίων,D_{pc} (μm)	0.7	2	2
Ογκομετρική παροχή, Q_{in} (m^3h^{-1})	0.371	0.211	0.241
Παράγοντας Σ (αδιάστατος)	6435	106	106
Ταχύτητα περιστροφής, N (rpm)	4150	1261	1261
Χρόνος παραμονής, HRT (min)	9.64	10.89	10.88

9.7.6 Σχεδιασμός χώρου φυσικής ξήρανσης

Για την εκτίμηση του απαιτούμενου χρόνου ηλιακής ξήρανσης της συμπυκνωμένης βιομάζας χρησιμοποιήθηκε εμπειρικό μοντέλο λεπτής στοιβάδας. Η επιλογή του μοντέλου βασίστηκε στη μελέτη των (Agbede et al., 2020), οι οποίοι εξέτασαν την ξήρανση πάστας του στελέχους *Chlorella* sp. με διαφορετικές τεχνικές ξήρανσης, συμπεριλαμβανομένης της ηλιακής. Στη συγκεκριμένη εργασία αξιολογήθηκαν διάφορα μαθηματικά μοντέλα ξήρανσης και διαπιστώθηκε ότι, για την ηλιακή ξήρανση, το μοντέλο των Wang & Singh για ξήρανση λεπτής στιβάδας περιέγραφε καταλληλότερα την πειραματική κινητική ξήρανσης.

$$MR = 1 + at + bt^2 \quad (63)$$

όπου t ο χρόνος ξήρανσης [min], ενώ a και b είναι εμπειρικές σταθερές του μοντέλου τις οποίες υπολογίζουν ίσες με -0.0006 και 7.66 × 10-6, αντίστοιχα (R^2=0.996).

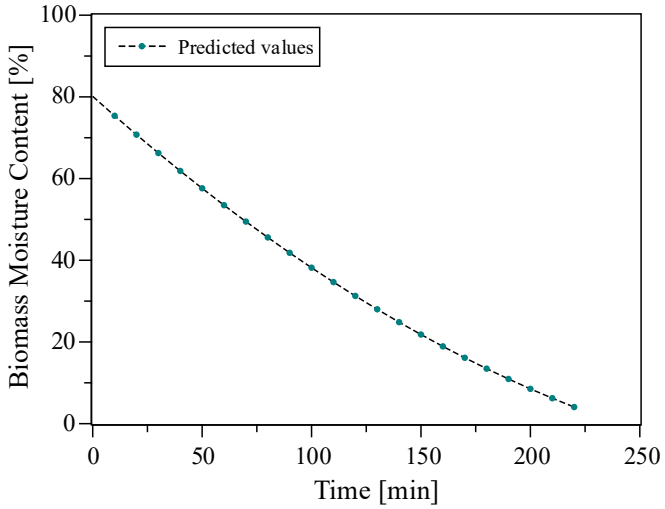
Ο λόγος υγρασίας ορίζεται γενικά ως:

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} \quad (64)$$

όπου M_0 είναι η αρχική υγρασία, M_t η υγρασία τη χρονική στιγμή t, και M_e η υγρασία ισορροπίας (που μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα). Οι υγρασίες εκφράζονται σε ξηρή βάση, δηλαδή σε kg νερού ανά kg ξηρών στερεών.

Ο χρόνος που προκύπτει από την παραπάνω σχέση χρησιμοποιήθηκε ως χρόνος παραμονής της βιομάζας στο στάδιο ηλιακής ξήρανσης, ενώ η απαιτούμενη επιφάνεια ξήρανσης, A_{sun} [m^2] υπολογίστηκε από τον όγκο της υγρής βιομάζας που εισέρχεται ημερησίως, V_{in} [m^3] στο στάδιο ξήρανσης και από το επιλεγμένο πάχος στρώσης, δ [m] όπου λαμβάνεται ίσο με 0.05 m:

$$A_{dry} = \frac{V_{in}}{\delta} \tag{65}$$



Διάγραμμα 9.12: Υπολογισμός της περιεκτικότητας σε υγρασία της βιομάζας συναρτήσει του χρόνου ξήρανσης, σύμφωνα με το μοντέλο Wang & Signh.

Πίνακας 25: Συγκεντρωτικός πίνακας σχεδιασμού σταδίου φυσικής ξήρανσης.

Παράμετρος	Τιμή
Επιφάνεια, A_{sun} (m^2)	43.1
Χρόνος παραμονής, HRT (h)	3.2

9.7.7 Σχεδιασμός Screw press

Η προκαταρκτική διαστασιολόγηση του Screw press βασίστηκε στην απαιτούμενη ημερήσια παροχή χωνεμένου υπολείμματος που προκύπτει από τα ισοζύγια μάζας της γραμμής προεπεξεργασίας μόνο για το Σενάριο 2. Δεδομένου ότι η συγκεκριμένη γραμμή θεωρείται ότι λειτουργεί σε σταθερό ημερήσιο κύκλο η επιλογή και αξιολόγηση του εξοπλισμού πραγματοποιήθηκε με βάση την πραγματική ωριαία παροχή κατά το χρονικό διάστημα ενεργού λειτουργίας.

Παράλληλα, για τον προκαταρκτικό σχεδιασμό ελήφθη υπόψη όχι μόνο η συνολική υδραυλική παροχή, αλλά και το φορτίο των στερεών που περιέχεται στο εισερχόμενο digestate, καθώς η απόδοση και η μηχανική συμπεριφορά της Screw press επηρεάζονται σημαντικά από τη συγκέντρωση

και τα φυσικά χαρακτηριστικά της στερεάς φάσης. Η εκτίμηση της απαιτούμενης ισχύος πραγματοποιήθηκε σε προκαταρκτικό επίπεδο μέσω κατάλληλης εμπειρικής προσέγγισης, η οποία λαμβάνει υπόψη τη δυναμικότητα επεξεργασίας, το ενεργό μήκος του κοχλία, την αντίσταση του υλικού, την πιθανή κλίση του εξοπλισμού και τις μηχανικές απώλειες του συστήματος μετάδοσης (Εξίσωση 66).

$$P(kW) = \frac{Q_{feed} L (w_0 + \sin\beta)}{367\eta} \tag{66}$$

Για την τελική επιλογή προβλέπεται κατάλληλο περιθώριο σχεδιασμού, ώστε να καλύπτονται πιθανές αποκλίσεις στη σύσταση του χωνεμένου υπολείμματος, μεταβολές της περιεκτικότητας σε στερεά, αυξημένες αντιστάσεις κατά τη λειτουργία και απαιτήσεις εκκίνησης. Σε περίπτωση που η απαιτούμενη παροχή δεν αντιστοιχεί ακριβώς σε διαθέσιμο εμπορικό μέγεθος, επιλέγεται εξοπλισμός με ονομαστική δυναμικότητα ίση ή μεγαλύτερη από την απαιτούμενη.

Πίνακας 26:Συγκεντρωτικός πίνακας παραμέτρων σχεδιασμού Screw press

Παράμετρος	Τιμή
Συντελεστής αντίστασης, w_o $(αδιάστατος)$	4
Μήκος, L $[m]$	0.8
Ισχύς screw press, P $[kW]$	0.033

10. ΤΕΧΝΟΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ

10.1 Εκτιμηση κοστουσ αγορασ εξοπλισμου

Η εκτίμηση του κόστους αγοράς του απαιτούμενου εξοπλισμού πραγματοποιήθηκε με βάση τη μεθοδολογία κοστολόγησης που προτείνεται στη βιβλιογραφία (Κούκος, 2019). Οι υπολογισμοί πραγματοποιήθηκαν με βάση την αρχική δυναμικότητα σχεδιασμού που έχει επιλεγεί για την εξεταζόμενη μονάδα και η οποία αποτέλεσε τη βάση διαστασιολόγησης και οικονομικής αξιολόγησης του επιμέρους εξοπλισμού. Για κάθε στοιχείο εξοπλισμού προσδιορίστηκε το κατάλληλο χαρακτηριστικό μέγεθος σχεδιασμού, ανάλογα με τη φύση και τη λειτουργία του. Στις περιπτώσεις όπου ήταν διαθέσιμα βιβλιογραφικά δεδομένα αναφοράς για το κόστος αγοράς και τη δυναμικότητα του αντίστοιχου εξοπλισμού, η εκτίμηση του κόστους στην απαιτούμενη δυναμικότητα πραγματοποιήθηκε με εφαρμογή σχέσης κλιμάκωσης (Εξίσωση 67). Για κάθε περίπτωση χρησιμοποιήθηκε το διαθέσιμο κόστος αναφοράς, $Cost_A$, η αντίστοιχη δυναμικότητα, $Size_A$, η απαιτούμενη δυναμικότητα σχεδιασμού, $Size_B$ και ο βιβλιογραφικός εκθέτης κλιμάκωσης n. Η μέθοδος λαμβάνει υπόψη τις οικονομίες κλίμακας που χαρακτηρίζουν τον βιομηχανικό εξοπλισμό και θεωρεί ότι η μεταβολή του κόστους αγοράς δεν είναι γραμμικά ανάλογη της μεταβολής της δυναμικότητας.

$$Cost_B = Cost_A \left(\frac{Size_B}{Size_A}\right)^n \tag{67}$$

Ωστόσο, για ορισμένα στοιχεία εξοπλισμού δεν ήταν διαθέσιμος κατάλληλος βιβλιογραφικός εκθέτης κλιμάκωσης ή αντίστοιχη σχέση κοστολόγησης. Στις περιπτώσεις αυτές συλλέχθηκαν διαθέσιμα δεδομένα κόστους αγοράς και χαρακτηριστικού μεγέθους για εξοπλισμό διαφορετικών δυναμικοτήτων. Τα δεδομένα προσαρμόστηκαν σε σχέση δυναμικού νόμου της μορφής $C = aX^n$, όπου C είναι το κόστος αγοράς, X, το χαρακτηριστικό μέγεθος του εξοπλισμού, ενώ a και n οι παράμετροι της προσαρμογής. Οι παράμετροι αυτές προσδιορίστηκαν ξεχωριστά για κάθε κατηγορία εξοπλισμού και οι προκύπτουσες καμπύλες κόστους–δυναμικότητας χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση του κόστους στην απαιτούμενη δυναμικότητα σχεδιασμού. Οι αντίστοιχες συσχετίσεις παρουσιάζονται στο Παράρτημα Α.

Οι τιμές κόστους που προέκυψαν από τις βιβλιογραφικές εξισώσεις, καθώς και εκείνες που υπολογίστηκαν μέσω της αναγωγής με τον κανόνα που αναλύσαμε παραπάνω, αντιστοιχούν στο επίπεδο τιμών του έτους αναφοράς της εκάστοτε πηγής. Δεδομένου ότι τα δεδομένα κοστολόγησης προέρχονται από διαφορετικές χρονικές περιόδους, απαιτήθηκε η μετατροπή τους σε κοινή χρονική βάση πριν από τον υπολογισμό του συνολικού κόστους αγοράς της εγκατάστασης. Ως κοινό έτος αναφοράς της παρούσας οικονομικής ανάλυσης επιλέχθηκε το 2024. Η χρονική αναγωγή πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του Δείκτη Κόστους Εγκαταστάσεων Χημικής Μηχανικής (Chemical Engineering Plant Cost Index, CEPCI). Για κάθε στοιχείο εξοπλισμού χρησιμοποιήθηκε η τιμή του δείκτη που αντιστοιχεί στο έτος αναφοράς του αρχικού δεδομένου κόστους και η αντίστοιχη τιμή του CEPCI για το 2024. Η χρονική αναγωγή εφαρμόστηκε επί του κόστους που είχε ήδη προσαρμοστεί στην απαιτούμενη δυναμικότητα σχεδιασμού και σε συνδυασμό με τα βιβλιογραφικά δεδομένα της μεταβολής του CEPCI καταλήξαμε στην έκφραση όλων των επιμέρους τιμών σε ενιαίο επίπεδο τιμών του 2024, ανεξάρτητα από τη χρονολογία προέλευσης των αρχικών δεδομένων (Πίνακας 27).

Πίνακας 27: Μεταβολή του CEPCI κατά την πάροδο του χρόνου (Cost Indices – Towering Skills).

Χρονολογία	CEPCI

1994	368.1
2017	567.5
2024	798.8

Πίνακας 28: Εξισώσεις για την κοστολόγηση αγοράς του εξοπλισμού.

Εξοπλισμός	Ποσότητα		Κόστος (€ @2024)	Εύρος	Ανα-φορά
	Σενά-ριο 1	Σενά-ριο 2			
Προεπεξεργασία digestate					
Δεξαμενή α-ποθήκευσης digestate	0	1	$\frac{CEPCI_{2024}}{CEPCI_{1994}} 4700 \left(\frac{x}{3.8}\right)^{0.3}$	$x\ [m^3] \leq 5$	(Κούκος, 2019)
Screw press	0	1	$332.1x^{0.369}$ (68)	$480 \leq x \left[\frac{kg}{h}\right] \leq 8{,}333$	Παράρ-τημα Α
Φυγόκεντρος τύπου de-canter	0	1	$\frac{CEPCI_{2024}}{CEPCI_{2017}} 250000 \left(\frac{x}{80}\right)^{0.6}$	$x \left[\frac{m^3}{h}\right] \leq 120$	(Fasaei, Bitter, Slegers, & van Boxtel, 2018)
Αντλίες	0	3	$550.9x^{0.629}$ (69)	$0.4 \leq x\ [kW] \leq 5.6$	Παράρ-τημα Α
			$131.8x^{0.710}$ (70)	$5.6 \leq x\ [kW] \leq 44.7$	
Καλλιέργεια μικροφυκών					
Θερμοκήπιο	1	2	$41.9x^{0.934}$ (71)	$15.0 \leq x\ [m^2] \leq 5{,}700$	Παράρ-τημα Α
Δοχείο απο-θήκευσης Μέ-σου	1	2	$\frac{CEPCI_{2024}}{CEPCI_{1994}} 4700 \left(\frac{x}{3.8}\right)^{0.3}$	$x\ [m^3] \leq 5$	(Κούκος, 2019)
OPR	1	1	$88.1x^{0.783}$ (72)	$450 \leq x\ [m^2] \leq 40{,}470$	Παράρ-τημα Α
Πτερύγιο ανά-δευσης	1	1	$23.4x^{0.780}$ (73)	$8{,}100 \leq x[m^2\ OPR] \leq 63{,}000$	Παράρ-τημα Α
Σύστημα εξαε-ρισμού	5	6	$9.3x^{0.433}$ (74)	$187 \leq x \left[\frac{m^3}{h}\right] \leq 44{,}500$	Παράρ-τημα Α
Αντλίες	3	2	$550.9x^{0.629}$ (75)		

			$131.8x^{0.710}$ (76)	$0.4 \leq x\ [kW] \leq 5.6$ $5.6 \leq x\ [kW] \leq 44.7$	Παράρτημα Α
Συγκομιδή και τελική ξήρανση					
Φίλτρα	1	1	$\frac{CEPCI_{2024}}{CEPCI_{2017}} 75900 \left(\frac{x}{50}\right)^{0.55}$	$x\ [m^2] \leq 100$	(Fasaei, Bitter, Slegers, & van Boxtel, 2018)
Φυγόκεντρος τύπου de-canter	1	1	$\frac{CEPCI_{2024}}{CEPCI_{2017}} 250000 \left(\frac{x}{80}\right)^{0.6}$	$x \left[\frac{m^3}{h}\right] \leq 120$	(Fasaei, Bitter, Slegers, & van Boxtel, 2018
Αντλίες	3	2	$550.9x^{0.629}$ (77) $131.8x^{0.710}$ (78)	$0.4 \leq x\ [kW] \leq 5.6$ $5.6 \leq x\ [kW] \leq 44.7$	Παράρτημα Α

10.2 Κοστος παγιου κεφαλαιου (FCI)

Ο υπολογισμός του συνολικού κόστους παγίου κεφαλαίου βασίστηκε στο συνολικό κόστος αγοράς του εξοπλισμού, C_P, όπως προέκυψε μέσω του. Το κόστος αγοράς αποτέλεσε τη βάση για την εκτίμηση των πρόσθετων δαπανών που απαιτούνται για την εγκατάσταση και πλήρη ενσωμάτωση του εξοπλισμού στη μονάδα.

Αρχικά υπολογίστηκαν οι άμεσες δαπάνες, οι οποίες συνδέονται με την εγκατάσταση και τη λειτουργική διασύνδεση του εξοπλισμού. Σε αυτές περιλαμβάνονται οι δαπάνες σωληνώσεων, οργάνων ελέγχου, ηλεκτρολογικών εγκαταστάσεων και λοιπών απαιτούμενων υποδομών. Οι επιμέρους δαπάνες εκτιμήθηκαν με την εφαρμογή κατάλληλων συντελεστών επί του κόστους αγοράς του εξοπλισμού. Στη συνέχεια προσδιορίστηκαν οι έμμεσες δαπάνες όπου σχετίζονται με τον σχεδιασμό, την επίβλεψη και τη συνολική υλοποίηση του έργου και δεν μπορούν να αποδοθούν άμεσα σε συγκεκριμένο στοιχείο εξοπλισμού. Το συνολικό κόστος παγίου κεφαλαίου για το Σενάριο 2 λόγω της ύπαρξης παραπάνω μηχανημάτων βρέθηκε υψηλότερο προσεγγίζοντας τις **750,000 €** (Πίνακας 29). Πιο συγκεκριμένα, την μεγαλύτερη συνεισφορά στον υπολογισμό του πάγιου κεφαλαίου έχει η προμήθεια του εξοπλισμού όπου αντιστοιχεί στο 47% του συνολικού κόστους πάγιου κεφαλαίου τόσο για το Σενάριο 1 **(329,191 €)** όσο και το Σενάριο 2 **(353,700 €)**. Από εκεί και πέρα, δεδομένου ότι τα περισσότερα επιμέρους κόστη υπολογίζονται ως ποσοστό του κόστους αγοράς του εξοπλισμού, οι σημαντικότερες πρόσθετες δαπάνες αφορούν την εγκατάσταση του εξοπλισμού, τον αυτόματο έλεγχο και τα όργανα, καθώς και το κόστος των κτιριακών εγκαταστάσεων

Πίνακας 29:Ανάλυση κόστους πάγιου κεφαλαίου(FCI)

					Σενάριο 1	Σενάριο 2
Κόστος Πάγιου Κεφαλαίου (FCI)	Άμεσα Κόστη	Onsite	Προμήθεια εξοπλισμού	C_p	329,191 €	353,700 €
			Εγκατάσταση εξοπλισμού	20%	65,838 €	70,740 €
			Αυτόματος έλεγχος και όργανα	15%	49,379 €	53,055 €
			Σωληνώσεις	5%	16,460 €	17,685 €
			Ηλεκτρολογικός εξοπλισμός	12%	39,503 €	42,444 €
		Offsite	Βελτίωση οικοπέδου και βοηθητικές παροχές	10%	32,919 €	35,370 €
			Οικόπεδο	6%	19,751 €	21,222 €
			Κτίρια	15%	49,379 €	53,055 €
	Έμμεσα Κόστη		Έξοδα ανεγέρσεως και αμοιβή εργολάβου	6%	36,145 €	38,836 €
			Απρόβλεπτα	5%	30,121 €	32,364 €
			Μελέτη και επίβλεψη	5%	30,121 €	32,364 €
				Άμεσο Κόστος (DC)	602,420 €	647,271 €
				Έμμεσο Κόστος (IC)	96,387 €	103,563 €
				Κόστος Πάγιου Κεφαλαίου (FCI)	**698,807 €**	**750,835 €**

10.3 Υπολογισμος συνολικου κοστους παραγωγης (TPC)

Ο υπολογισμός του συνολικού κόστους παραγωγής βασίστηκε στην εκτίμηση των ετήσιων λειτουργικών δαπανών της μονάδας, λαμβάνοντας υπόψη τις βοηθητικές παροχές, την άμεση εργασία, τη μισθοδοσία του προσωπικού και τις λοιπές επιβαρύνσεις λειτουργίας. Αξίζει να σημειωθεί πως στα έξοδα αυτά λαμβάνονται υπόψιν και οι πρώτες ύλες οι οποίες όμως εντάσσονται μόνο στην περίπτωση του Σεναρίου 1 καθώς στο Σενάριο 2 οι πρώτες ύλες της διεργασίας θεωρούνται μηδενικές καθώς αποτελούν απόβλητα αγροκτηνοτροφικής προέλευσης.

Η αυξημένη ενεργειακή κατανάλωση του Σεναρίου 1 αποδίδεται κυρίως στις απαιτήσεις λειτουργίας της αντλίας ανακυκλοφορίας η οποία έχει ενεργειακή κατανάλωση ίση με 18% της συνολικής απαιτούμενης ενέργειας ανά ημέρα $(26.3\ kWh\ d^{-1})$ και παρουσιάζει σημαντικά υψηλότερη ισχύ σε σχέση με τον υπόλοιπο εξοπλισμό $(3.29\ kW)$. Αντίθετα, στο Σενάριο 2 η πρόσθετη κατανάλωση

που συνδέεται με τα στάδια προεπεξεργασίας παραμένει σχετικά περιορισμένη, καθώς ο συνολικός εξοπλισμός προεπεξεργασίας αντιστοιχεί στο 7% της συνολικής καταναλισκόμενης ενέργεας ($9.66\ kWh\ d^{-1}$). Ως αποτέλεσμα, παρά την ύπαρξη περισσότερων επιμέρους στοιχείων εξοπλισμού, το συνολικό ενεργειακό φορτίο του Σεναρίου 2 διαμορφώνεται σε χαμηλότερο επίπεδο (Πίνακας 30). Επιπλέον, αξίζει να σημειωθεί πως το στάδιο του διαχωρισμού της βιομάζας μέσω φίλτρων απαιτεί $47.4\ και\ 46.2\ kWh\ d^{-1}$ για τα δύο Σενάρια αντίστοιχα, γεγονός που πιστοποιεί τις υψηλές απαιτήσεις που έχει το στάδιο συμπύκνωσης και τελικής ξήρανσης στην συγκεκριμένη μονάδα.

Πίνακας 30: Συγκεντρωτικός πίνακας κατανάλωσης ενέργειας του εξοπλισμού για τα δύο σενάρια

Εξοπλισμός	Καταναλισκόμενη Ισχύς $[kW]$	Ενεργειακή κατανάλωση $[kWh\ d^{-1}]$
Σενάριο 1		
Δεξαμενή μέσου με ανάδευση	0.98	11.76
Αντλία τροφοδοσίας δεξαμενής μέσου	0.291	0.6
Αντλία τροφοδοσίας αντιδραστήρα	0.291	0.6
Σύστημα εξαερισμού	1.06	25.4
Πτερύγιο ανάδευσης	1.10	26.4
Αντλία τροφοδοσίας φίλτρων	0.4	3.2
Φίλτρα		47.4
Αντλία τροφοδοσίας φυγοκέντρου	0.002	0.016
Φυγόκεντρος για συμπύκνωση		1.685
Αντλία ανακυκλοφορίας νερού	3.29	26.3
Σύνολο	**7.12**	**143.4**
Σενάριο 2		
Αντλία τροφοδοσίας SP	0.4	3.2
Screw press	0.03	0.26
Φυγόκεντρος digestate		3.0
Αντλία τροφοδοσίας δεξαμενής μέσου	0.4	3.2
Αντλία συμπλήρωσης νερού	1.06	1.1
Αντλία τροφοδοσίας αντιδραστήρα	0.3	0.6
Σύστημα εξαερισμού	1.3	31.2
Πτερύγιο ανάδευσης	1.33	31.9
Αντλία τροφοδοσίας φίλτρων	0.4	3.2
Φίλτρα		46.2
Αντλία τροφοδοσίας φυγοκέντρου	0.002	0.016
Φυγόκεντρος για συμπύκνωση		1.7

Σύνολο		**122.6**

Οι βοηθητικές παροχές υπολογίστηκαν από τις απαιτήσεις της διεργασίας σε ηλεκτρική ενέργεια και νερό, με βάση τις παροχές των ρευμάτων, την ισχύ του εξοπλισμού και τις ώρες λειτουργίας κάθε μονάδας (Πίνακας 31).

Πίνακας 31:Πίνακας κοστολόγησης βοηθητικών παροχών της διεργασίας

Παροχή	Κόστος
Νερό	$1.1€\ m^{-3}$
Ηλεκτρισμός	$0.149€\ kWh^{-1}$

Η άμεση εργασία εκτιμήθηκε ανάλογα με τις ανάγκες χειρισμού και επίβλεψης κάθε σταδίου της διεργασίας. Στάδια όπως η προεπεξεργασία του digestate, ο μηχανικός διαχωρισμός, η παρακολούθηση της καλλιέργειας και η συγκομιδή της βιομάζας απαιτούν μεγαλύτερη ανθρώπινη συμμετοχή σε σχέση με βοηθητικές λειτουργίες, όπως η αποθήκευση ή η μεταφορά των ρευμάτων. Παράλληλα, η μισθοδοσία υπολογίστηκε με διαφοροποίηση ανά θέση εργασίας, ώστε να αποτυπώνεται η διαφορετική επιβάρυνση μεταξύ χειριστών, τεχνικού προσωπικού, επιστημονικής επίβλεψης και διοικητικής υποστήριξης.

Πίνακας 32: Άμεση εργασία ανάλογα την μονάδα εξοπλισμού.

Εξοπλισμός	Συντελεστής εργαζομένων ανά μέρος εξοπλισμού		Εργαζόμενοι Ανά Βάρδια	
			Σενάριο 1	Σενάριο 2
Screw press	0.1	-	0.3	
Φυγόκεντρος προεπεξεργασίας digestate	0.1	-	0.3	
Δεξαμενή ανάδευσης μέσου	0.1	0.1	-	
Θερμοκήπιο	0.1	0.1	0.2	
Σύστημα εξαερισμού	0.05	0.25	0.3	
ORP	2	2	2 (Alavianghavanini et al., 2024)	
Πτερύγιο	0.2	0.2	0.2	
Φίλτρα	0.1	0.1	0.1	
Φυγόκεντρος	0.3	0.3	0.3	
Συνολικά			3.1	3.7

Συνολικά [ROUNDUP(;0)]	4	4

Πίνακας 33:Μισθοδοσία προσωπικού ανάλογα την θέση εργασίας

Προσωπικό	Ετήσιος Μισθός	Συνολικό κόστος με εισφορές	Αριθμός ανά Βάρδια	Αναφορά
Διευθυντής Παραγωγής	29,473 €	35,895 €	0.33	[1]
Ανώτερος Διοικητικός Υπάλληλος	19,384 €	23,607 €	0.33	[2]
Κατώτερος Διοικητικός Υπάλληλος	17,280 €	21,044 €	0.33	[3]
Μηχανικός	16,720 €	20,363 €	0.33	[4]
Εργάτης	13,000 €	15,832 €	4	[5]
Τεχνικός Συντήρησης	13,200 €	16,076 €	0.33	[6]
Οδηγός Εμπορευμάτων	13,200 €	16,076 €	0.33	[7]

Ο υπολογισμός του συνολικού κόστους παραγωγής βασίστηκε στην εκτίμηση των βασικών ετήσιων λειτουργικών δαπανών της μονάδας, λαμβάνοντας υπόψη τις βοηθητικές παροχές, την άμεση εργασία, τη μισθοδοσία του προσωπικού και τις λοιπές λειτουργικές επιβαρύνσεις. Οι βοηθητικές παροχές υπολογίστηκαν με βάση τις επιμέρους απαιτήσεις της διεργασίας σε νερό και ηλεκτρική ενέργεια, όπως αυτές προέκυψαν από τα ισοζύγια μάζας και την κατανάλωση του εξοπλισμού. Συγκεκριμένα, το συνολικό κόστος παραγωγής αυξάνεται από περίπου $715{,}500\ €$ στο Σενάριο 1 σε $826{,}340\ €$ στο Σενάριο 2, παρουσιάζοντας αύξηση περίπου 15,5% (Πίνακας 34). Η διαφοροποίηση αυτή οφείλεται στο μεγαλύτερη απαίτηση βοηθητικών παροχών C_{UT} , άμεσης εργασίας C_{OL} και κόστους παγίου κεφαλαίου FCI . Παρότι στο Σενάριο 2 το κόστος των πρώτων υλών θεωρείται μηδενικό, η εξοικονόμηση αυτή δεν επαρκεί για να αντισταθμίσει την πρόσθετη επιβάρυνση που προκύπτει από τις αυξημένες λειτουργικές και κεφαλαιουχικές απαιτήσεις. Ως αποτέλεσμα, το συνολικό κόστος παραγωγής του Σεναρίου 2 διαμορφώνεται σε υψηλότερο επίπεδο (Πίνακας 34). Η συγκεκριμένη διαφορά καταδεικνύει ότι η οικονομική επιβάρυνση του Σεναρίου 2 συνδέεται περισσότερο με την πολυπλοκότητα της διεργασίας και τις ανάγκες λειτουργίας της μονάδας παρά με το κόστος των πρώτων ς δύο προηγούμενους παράγοντες, και ως αποτέλεσμα το συνολικό κόστος παραγωγής του Σεναρίου 2 είναι υψηλότερο. Επιπλέον, η αύξηση των βασικών αυτών συνιστωσών μεταφέρεται και σε επιμέρους κατηγορίες κόστους, όπως τα γενικά έξοδα, η επίβλεψη, η συντήρηση, οι επιβαρύνσεις και οι λοιπές δαπάνες που υπολογίζονται συναρτήσει των 3 συνιστωσών που προαναφέθηκαν (Εξίσωση 79). Συνεπώς, η επίδραση των αυξημένων λειτουργικών και κεφαλαιουχικών απαιτήσεων δεν περιορίζεται μόνο στις επιμέρους αρχικές δαπάνες, αλλά ενισχύεται μέσω των εξαρτώμενων συνιστωσών κόστους, οδηγώντας τελικά σε υψηλότερο συνολικό κόστος παραγωγής για το Σενάριο 2.

$$\boldsymbol{TPC} = 1.22(C_{RM} + C_{UT}) + 2.66C_{OL} + 0.295FCI \quad (79)$$

Πίνακας 34: Ανάλυση συνολικού κόστους παραγωγής (TPC).

					Σενάριο 1	Σενάριο 2
Συνολικό Κόστος Παραγωγής (TPC)	Κόστος Βιομηχανοποίησης	Άμεσα Κόστη(DC)	Πρώτες Ύλες	C_{RM}	9,821 €	-
			Βοηθητικές Παροχές	C_{UT}	7,349 €	26,389 €
			Άμεση Εργασία	C_{OL}	183,610 €	215,282 €
			Επίβλεψη Λειτουργίας	$0.15C_{OL}$	27,542 €	32,292 €
			Συντήρηση και Επισκευές	$0.06FCI$	41,928 €	45,050 €
			Προμήθεια Λειτουργίας	$0.01C_{UT}$	73 €	264 €
			Κόστος Εργαστηρίου	$0.15C_{OL}$	27,542 €	32,292 €
			Δικαιώματα Ευρεσιτεχνίας	$0.03TPC$	21,465 €	24,790 €
		Σταθερά Κόστη(FC)	Απόσβεση	$0.05FCI$	34,940 €	37,542 €
			Φόροι	$0.03FCI$	20,964 €	22,525 €
			Ασφάλιση	$0.01FCI$	6,988 €	7,508 €
			Επιβαρύνσεις	$0.7C_{OL} + 0.04FCI$	71,550 €	82,634 €
	Γενικά Έξοδα (GE)		Διοικητικά Έξοδα	$0.18C_{OL} + 0.01FCI$	40,038 €	46,259 €
			Πωλήσεις και Διανομή	$0.1TPC$	71,550 €	82,634 €
			Έρευνα Και Ανάπτυξη	$0.05TPC$	35,775 €	41,317 €
			DC	$C_{RM} + C_{UT} + 1.3C_{OL} + 0.07FCI + 0.03TPC$	319,331 €	376,359 €
			FC	$0.18FCI + 0.07C_{OL}$	134,443 €	150,209 €
			GE	$0.15TPC + 0.18C_{OL} + 0.01FCI$	147,363 €	170,210 €
			TPC	$DC + FC + GE$	**715,500 €**	**826,340 €**

10.4 Επενδυτικο πλανο

Το επενδυτικό πλάνο της προτεινόμενης μονάδας διαμορφώθηκε με βάση την αρχική δυναμικότητα σχεδιασμού και την αντίστοιχη συνολική κεφαλαιακή απαίτηση της εγκατάστασης και στις δύο περιπτώσεις. Στην αρχική επένδυση συνυπολογίζονται το συνολικό πάγιο κεφάλαιο και το απαιτούμενο κεφάλαιο κίνησης ενώ για την χρηματοδότηση της επένδυσης αυτής θεωρήθηκε λήψη δανείου (Εξίσωση 80).

$$Loan = FCI + WC \tag{80}$$

$$WC = 0.14FCI \tag{81}$$

Στην εξεταζόμενη μονάδα δεν προβλέπεται επιδότηση, ενώ η υπολειμματική αξία της εγκατάστασης στο τέλος της περιόδου αξιολόγησης θεωρείται μηδενική. Το επιτόκιο του δανείου ορίστηκε σε 7%, με αποπληρωμή σε τέσσερις ισόποσες ετήσιες δόσεις. Παράλληλα, για την αποτύπωση της σταδιακής μείωσης της λογιστικής αξίας των παγίων εφαρμόστηκε απόσβεση, με διάρκεια 20 ετών για τον εξοπλισμό και 30 ετών για τις κτιριακές εγκαταστάσεις. Το πρώτο έτος της ανάλυσης αντιστοιχεί στην περίοδο πραγματοποίησης της αρχικής επένδυσης, ενώ από το επόμενο έτος ενσωματώνονται στις ετήσιες ταμειακές ροές τα έσοδα από τη λειτουργία της μονάδας, το συνολικό κόστος παραγωγής, οι αποσβέσεις, οι τόκοι και οι υποχρεώσεις εξυπηρέτησης του δανείου. Με βάση τις ταμειακές αυτές ροές και τον επιλεγμένο ελάχιστο αποδεκτό βαθμό απόδοσης (MARR), πραγματοποιείται στη συνέχεια η οικονομική αξιολόγηση της επένδυσης μέσω της καθαρής παρούσας αξίας, του εσωτερικού βαθμού απόδοσης και του χρόνου αποπληρωμής.

Πίνακας 35: Τιμή προϊόντων στην αγορά.

Προϊόντα	Τιμή
Λίπασμα Αζώτου $[€\ tn^{-1}]$	1,930 €
Λίπασμα Φωσφόρου $[€\ tn^{-1}]$	3,030 €
Παραγόμενο βιολίπασμα $[€\ tn^{-1}]$	20,000-26,000 €

10.5 Καθαρη παρουσα αξια (NPV)

Η οικονομική αξιολόγηση του επενδυτικού σχεδίου βασίζεται αρχικά στην Καθαρή Παρούσα Αξία, η οποία εκφράζει τη διαφορά μεταξύ της παρούσας αξίας των μελλοντικών καθαρών ταμειακών ροών και του αρχικού επενδυμένου κεφαλαίου. Με τον τρόπο αυτό λαμβάνεται υπόψη η χρονική αξία του χρήματος και αξιολογείται κατά πόσο η επένδυση επιτυγχάνει την απαιτούμενη απόδοση. Θετική τιμή της NPV υποδηλώνει ότι η επένδυση δημιουργεί αξία σε σχέση με το επιλεγμένο προεξοφλητικό επιτόκιο, ενώ αρνητική τιμή υποδεικνύει ότι δεν επιτυγχάνεται η απαιτούμενη απόδοση.

$$CF = (S - E) - (1 - \Phi)(D - I) + D \tag{82}$$

Στην ανάλυση αυτή θεωρείται φορολογικός συντελεστής 20%, ενώ το δάνειο και οι αναλογούντες τόκοι αποπληρώνονται κατά τα πρώτα τρία έτη λειτουργίας της μονάδας. Ως αποτέλεσμα, οι ταμειακές ροές των πρώτων ετών επιβαρύνονται περισσότερο, ενώ μετά την ολοκλήρωση της αποπληρωμής η χρηματοοικονομική επιβάρυνση μειώνεται.

$$PV = \frac{CF}{(1+i)^N} \tag{83}$$

$$NPV = \sum_{k=0}^{N} \frac{CF_k}{(1+i)^k} \tag{84}$$

Συμπληρωματικά, χρησιμοποιείται ο Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης (IRR), ο οποίος ορίζεται ως το προεξοφλητικό επιτόκιο για το οποίο η NPV της επένδυσης μηδενίζεται (Εξίσωση 85). Ο IRR συ-

γκρίνεται με τον Ελάχιστο Αποδεκτό Βαθμό Απόδοσης (MARR), ο οποίος εκφράζει την ελάχιστη απόδοση που απαιτείται για να θεωρηθεί μία επένδυση οικονομικά αποδεκτή. Με βάση τις ετήσιες ταμειακές ροές της επένδυσης υπολογίστηκε ο Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης (IRR), δηλαδή το προεξοφλητικό επιτόκιο για το οποίο η Καθαρή Παρούσα Αξία μηδενίζεται.. Η σχετικά χαμηλή τιμή του IRR οφείλεται στο γεγονός ότι η επένδυση απαιτεί σημαντικό αρχικό κεφάλαιο, ενώ οι καθαρές εισροές που δημιουργούνται κατά τη διάρκεια λειτουργίας της μονάδας δεν είναι αρκετά υψηλές ώστε να αποσβέσουν την επένδυση με μεγαλύτερο απαιτούμενο βαθμό απόδοσης.

$$0 = \sum_{k=0}^{n} \frac{CF_k}{(1 + IRR)^k} \tag{85}$$

Πίνακας 36: Πίνακας επιλογών κατάλληλων παραμέτρων για την αξιολόγηση του επενδυτικού πλάνου

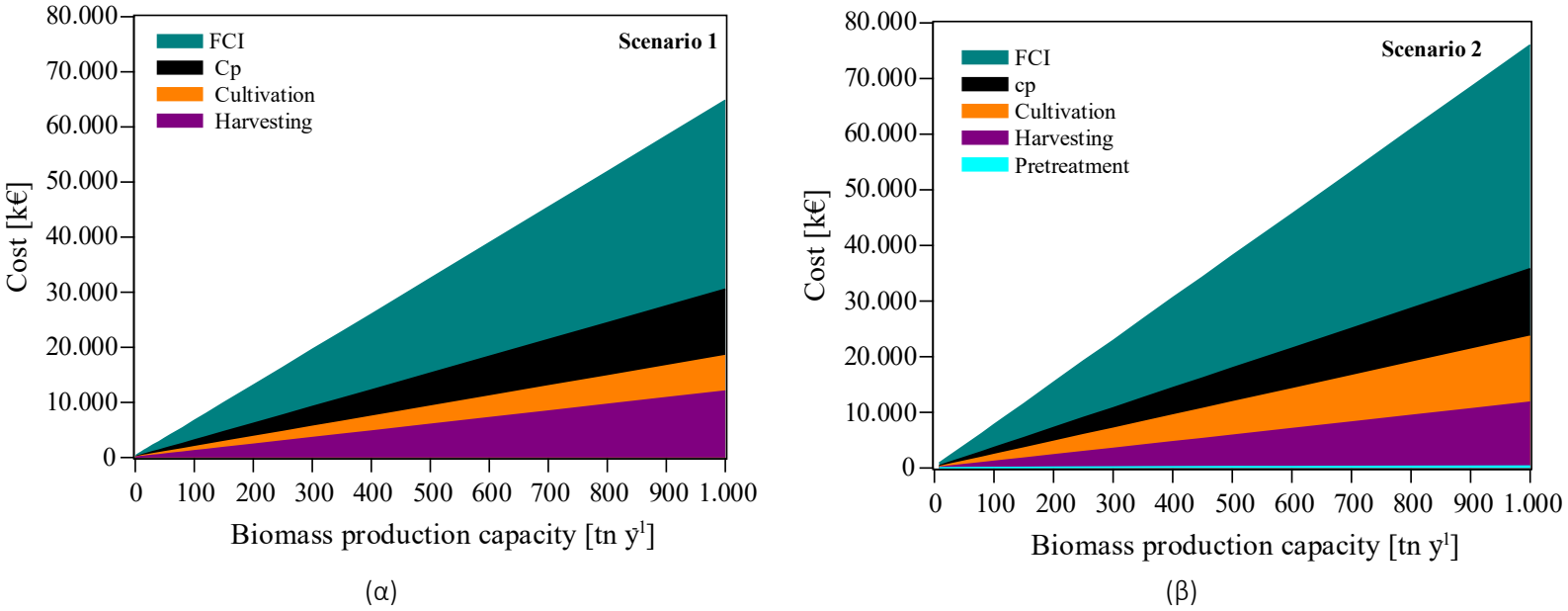
Παράμετρος	Τιμή
Φορολογικός συντελεστής	20%
Επιτόκιο	7%
Ελάχιστος Αποδεκτός Βαθμός Απόδοσης, $MARR$	10%
Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης, IRR	3.91%

10.6 Επίδραση της δυναμικοτητας στην τεχνοοικονομικη αποδοση

Η αξιολόγηση του επενδυτικού πλάνου έγινε βάσει της αρχικής δυναμικότητας που είχε θεωρηθεί. Πιο συγκεκριμένα, για τη διερεύνηση της επίδρασης της παραγωγικής δυναμικότητας στο συνολικό κόστος, εξετάστηκε η μεταβολή των επιμέρους συνιστωσών κόστους σε συνάρτηση με την ετήσια παραγωγή βιομάζας για τα δύο σενάρια. Η ανάλυση περιλαμβάνει το πάγιο κεφάλαιο επένδυσης, το λειτουργικό κόστος καθώς και τα κόστη που σχετίζονται με τα επιμέρους στάδια της διεργασίας (Διάγραμμα 10.1).

Κατά την ανάλυση της επίδρασης της δυναμικότητας παρατηρείται ότι το κόστος πάγιου κεφαλαίου αυξάνεται σχεδόν γραμμικά με την αύξηση της δυναμικότητας και στα δύο σενάρια. Η συμπεριφορά αυτή συνδέεται με το γεγονός ότι, όσο αυξάνεται η απαιτούμενη παραγωγή, αυξάνεται αντίστοιχα και το απαιτούμενο μέγεθος και ο αριθμός των επιμέρους μονάδων εξοπλισμού, με αποτέλεσμα το συνολικό κόστος αγοράς να ακολουθεί τη μορφή της αντίστοιχης εξίσωσης κλιμάκωσης $(Cost_A = NSize, max_A^n + Size_A{}^n)$. Στην πράξη, όταν ο αριθμός των παράλληλων μονάδων αυξάνεται διακριτά, ο κύριος όρος του συνολικού κόστους αποκτά σχεδόν γραμμική εξάρτηση από τη δυναμικότητα, ενώ η μικρή καμπυλότητα του διαγράμματος οφείλεται κυρίως στον όρο κλιμάκωσης του κόστους κάθε επιμέρους μονάδας και στις οικονομίες κλίμακας. Ακόμη και στην υποθετική περίπτωση όπου αγνοούνταν τα ανώτερα όρια των χαρακτηριστικών μεγεθών του εξοπλισμού και κάθε μονάδα μπορούσε να αυξάνει συνεχώς το μέγεθός της, η συνολική τάση δεν θα μεταβαλλόταν σημαντικά. Αυτό οφείλεται κυρίως στη μεγάλη συμμετοχή του θερμοκηπίου στο συνολικό κόστος αγοράς εξοπλισμού, η οποία προσεγγίζει το 30%. Το κόστος του θερμοκηπίου περιγράφεται από δυναμοσυνάρτηση με εκθέτη κλιμάκωσης $n = 0.94$ δηλαδή πολύ κοντά στη μονάδα, με αποτέλεσμα να προσεγγίζει την γραμμική αύξηση του κόστους του παγίου κεφαλαίου. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην αδυναμία των συλλεχθέντων δεδομένων αγοράς καθώς πρακτικά η κοστολόγηση της κατασκευής των θερμοκηπίων συμβαίνει ανά στρέμμα, ακολουθώντας όντως γραμμική συσχέτιση με την κλίμακα τους (Δεδομένα Αγοράς) . Οι (Alavianghavanini et al., 2024) εκτίμησαν στο πλαίσιο της δικής

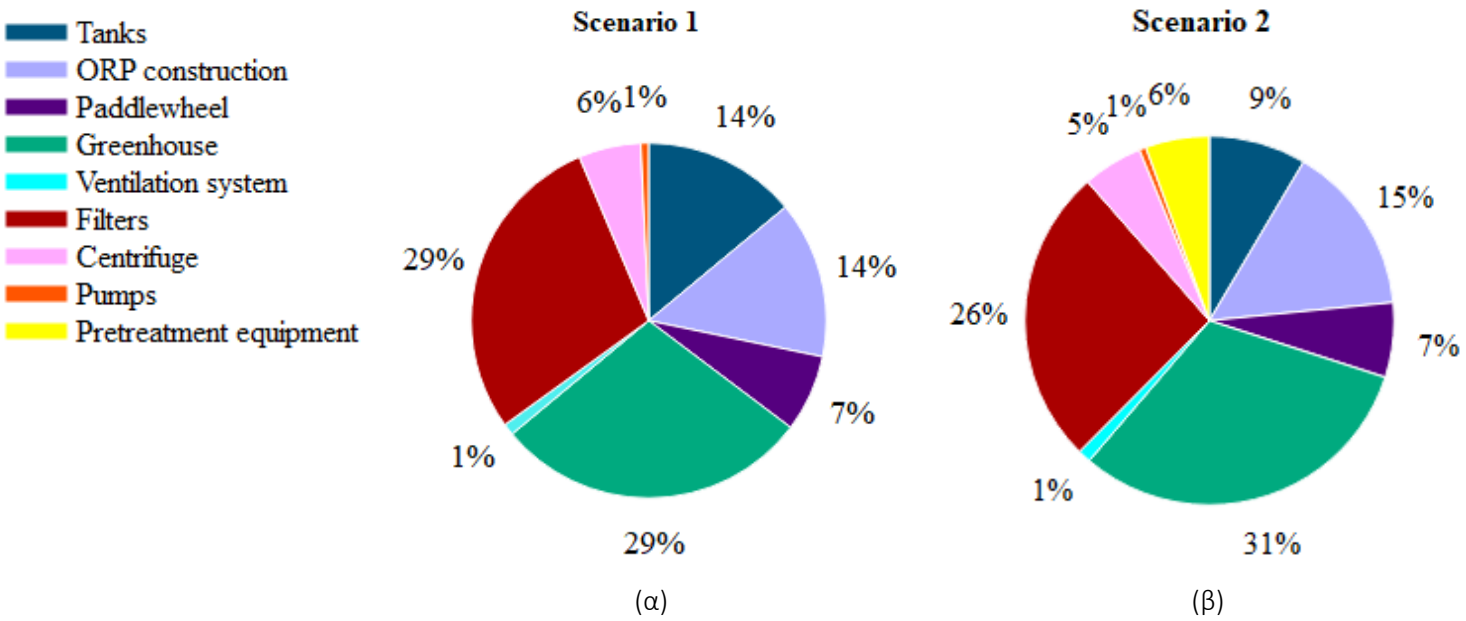
τους τεχνοοικονομικής ανάλυσης, ότι το συνολικό πάγιο κεφάλαιο για δυναμικότητα $1000\ tn\ year^{-1}$ ίσο με $30.12M€$. Στην δική μας περίπτωση για την ίδια δυναμικότητα βρέθηκε $64.4\ και\ 76M€$ για τα δύο σενάρια αντίστοιχα. Η απόκλιση μεταξύ των δύο τιμών αποδίδεται κυρίως στις διαφορετικές σχεδιαστικές παραδοχές και στην ύπαρξη θερμοκηπίου στη δική μας διάταξη, το οποίο αποτελεί σημαντική συνιστώσα του συνολικού πάγιου κεφαλαίου. Αντίθετα, στη μελέτη των (Alavianghavanini et al., 2024) ο ανοικτός αντιδραστήρας τύπου raceway λειτουργεί χωρίς θερμοκηπιακή κάλυψη και είναι άμεσα εκτεθειμένος στις ατμοσφαιρικές συνθήκες. Επιπλέον, η κοστολόγηση του θερμοκηπίου στην παρούσα εργασία βασίστηκε σε προσαρμογή βιβλιογραφικών δεδομένων. Έτσι, καθώς η παραγωγική δυναμικότητα αυξάνεται, η απαιτούμενη επιφάνεια του θερμοκηπίου υπερβαίνει το εύρος των διαθέσιμων βιβλιογραφικών δεδομένων, με αποτέλεσμα η εκτίμηση να βασίζεται σε εξωtrapolation και, συνεπώς, να συνοδεύεται από αυξημένη αβεβαιότητα.



Διάγραμμα 10.1: Μεταβολή του συνολικού κόστους πάγιου κεφαλαίου, του κόστους αγοράς εξοπλισμού, του κόστους προεπεξεργασίας, καλλιέργειας και συγκομιδής της βιομάζας συναρτήσει της δυναμικότητας της μονάδας.

Για την αξιολόγηση της επίδρασης του κόστους αγορά του εξοπλισμού έγινε αντίστοιχο διάγραμμα (Διάγραμμα 10.2). Πιο συγκεκριμένα, και στην περίπτωση των δύο σεναρίων φαίνεται ότι την μεγαλύτερη επίδραση στο κόστος αγοράς του εξοπλισμού την έχει το θερμοκήπιο με 95,465 € στο σενάριο 1 και 109,647€ για το Σενάριο 2. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην μεγάλη επιφάνεια που πρέπει να καλύψει καθώς και στην αντίστοιχη κατασκευαστική υποδομή. Επιπλέον, επειδή το κόστος του μεταβάλλεται σχεδόν γραμμικά με την επιφάνεια, η συμμετοχή του παραμένει σημαντική και όσο αυξάνεται η δυναμικότητα της μονάδας. Αντίστοιχη υψηλή συμμετοχή στο κόστος αγοράς έχουν και τα φίλτρα για το στάδιο συμπύκνωσης της παραγόμενης βιομάζας με τιμές 94,765 € και 102,049 € για τα δύο σενάρια αντίστοιχα. Η υψηλή συμμετοχή των φίλτρων στο κόστος αγοράς οφείλεται κυρίως στη μεγάλη συνολική απαιτούμενη μεμβρανική επιφάνεια. Στο Σενάριο 1 απαιτούνται περίπου 81 m² ενεργού επιφάνειας, ώστε να επεξεργαστεί η παροχή της καλλιέργειας πριν από τη φυγοκέντρηση. Επομένως, όσο αυξάνεται η παροχή και η παραγωγική δυναμικότητα, αυξάνεται αντίστοιχα και η απαιτούμενη επιφάνεια ή ο αριθμός των μονάδων διήθησης, με αποτέλεσμα σημαντική επιβάρυνση του κόστους αγοράς. Παρόμοια τάση ως προς τα σύστημα συλλογής της βιομάζας παρατηρείται και στην τεχνοικονομική ανάλυση των (Davis et al., 2016) όπου για

ανοικτή λίμνη τύπου raceway 10 acres, το 22% του συνολικού κόστους αγοράς εξοπλισμού πηγάζει από το στάδιο αφυδάτωσης. ενώ παρατηρείται οτι περίπου το 61% του εγκατεστημένου εξοπλισμού αποδίδεται στους φωτοβιοαντιδραστήρες παραγωγής βιομάζας γεγονός οφείλεται στην απουσία θερμοκηπίου στην δική τους περίπτωση.



(α) (β)

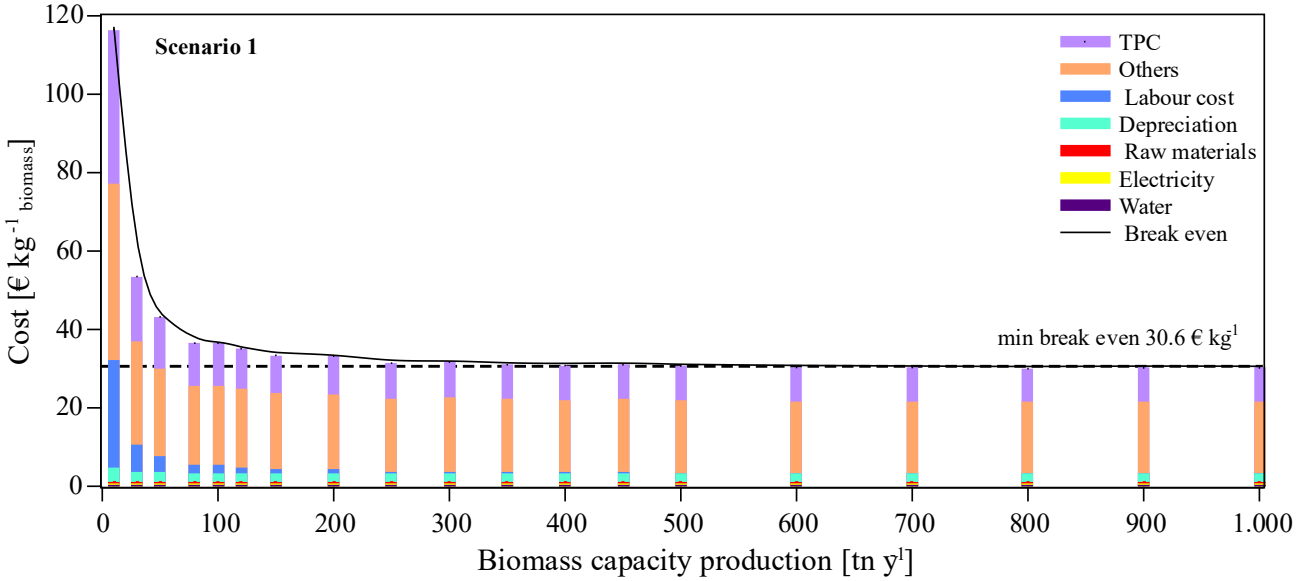
Διάγραμμα 10.2: Ποσοστιαία κατανομή του κόστους αγοράς εξοπλισμού ανά κατηγορία για (α) το Σενάριο 1 και (β) το Σενάριο 2.

Η ανάλυση επεκτάθηκε στον προσδιορισμό της ελάχιστης απαιτούμενης τιμής πώλησης της παραγόμενης βιομάζας για κάθε εξεταζόμενη δυναμικότητα, θεωρώντας ως συνθήκη οικονομικής ισορροπίας μηδενική καθαρή παρούσα αξία (NPV = 0) για τη συνολική διάρκεια ζωής της μονάδας. Παράλληλα, στο Διάγραμμα 10.3 παρουσιάζεται η μεταβολή του μοναδιαίου συνολικού κόστους παραγωγής (TPC) και των επιμέρους συνιστωσών του συναρτήσει της δυναμικότητας παραγωγής.

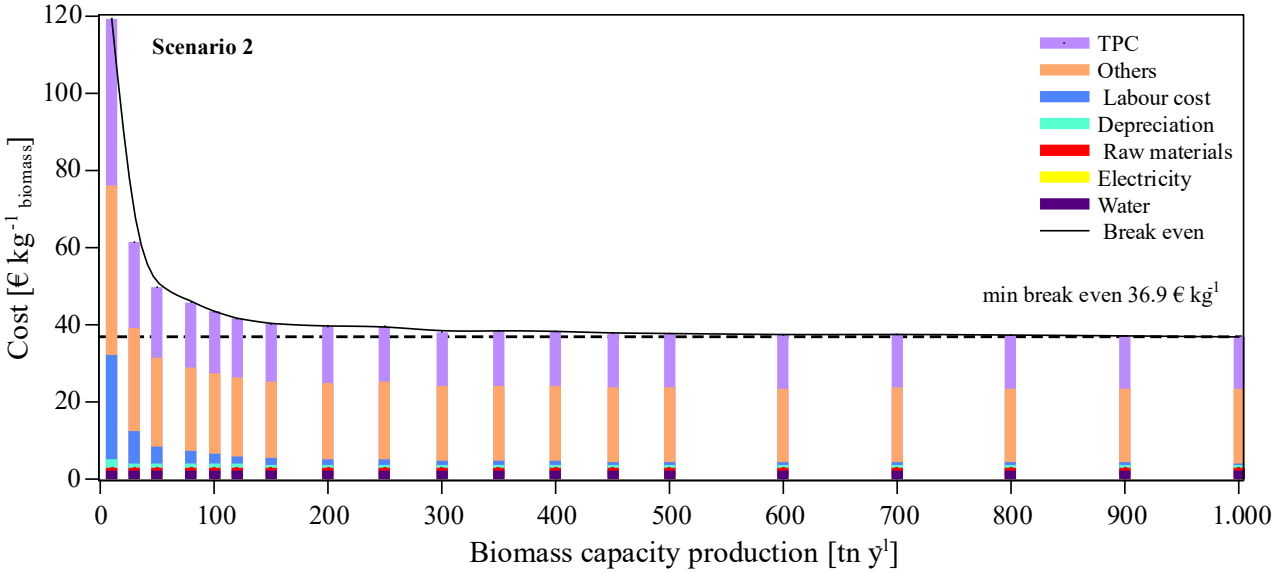
Στις πολύ χαμηλές δυναμικότητες, τόσο το μοναδιαίο κόστος παραγωγής όσο και η απαιτούμενη τιμή πώλησης είναι ιδιαίτερα υψηλά, καθώς οι σταθερές και κεφαλαιουχικές δαπάνες επιμερίζονται σε μικρή ποσότητα παραγόμενης βιομάζας. Με την αύξηση της δυναμικότητας, το μοναδιαίο κόστος μειώνεται απότομα και στη συνέχεια τείνει να σταθεροποιηθεί, γεγονός που αποτυπώνει την επίδραση των οικονομιών κλίμακας. Ενδεικτικά, μετά τις δυναμικότητες της τάξης των $200 - 300\ tn\ y^{-1}$ η περαιτέρω αύξηση της δυναμικότητας προσφέρει πλέον μικρότερη μείωση της απαιτούμενης τιμής πώλησης. Για παράδειγμα για δυναμικότητα ίση $200\ tn\ y^{-1}$ η τιμή ισοσκελισμού κυμαίνεται στα $33.7\ €\ kg^{-1}$ και $39.6\ €\ kg^{-1}$ για τα δύο Σενάρια αντίστοιχα, ενώ για δυναμικότητα $300\ tn\ y^{-1}$ οι τιμές αυτές γίνονται $32.1\ €\ kg^{-1}$ και $38.2\ €\ kg^{-1}$. Η διαφορά αυτή οφείλεται στο υψηλότερο συνολικό κόστος του Σεναρίου 2 το οποίο συνδέεται κυρίως με τις αυξημένες απαιτήσεις σε βοηθητικές παροχές, εργασίες και λοιπές λειτουργικές δαπάνες.

Παράλληλα με τη μείωση της τιμής ισοσκελισμού, μεταβάλλεται και η σχετική συμμετοχή των επιμέρους συνιστωσών στο συνολικό μοναδιαίο κόστος παραγωγής. Στις χαμηλές δυναμικότητες, το TPC είναι ιδιαίτερα υψηλό, καθώς οι σταθερές και κεφαλαιουχικές δαπάνες επιμερίζονται σε πολύ μικρή ποσότητα παραγόμενης βιομάζας. Με την αύξηση της δυναμικότητας από $50\ tn\ y^{-1}$ σε

$300\ tn\ y^{-1}$, το TPC υποχωρεί από περίπου $43.2\ €\ kg^{-1}$ σε $31.7\ €\ kg^{-1}$ στο Σενάριο 1 και $49.8\ €\ kg^{-1}$ σε $38.2\ €\ kg^{-1}$ στο Σενάριο 2.



(α)



(β)

Διάγραμμα 10.3: Μεταβολή του μοναδιαίου κόστους παραγωγής βιομάζας και των επιμέρους συνιστωσών του συναρτήσει της δυναμικότητας της μονάδας (α) για το Σενάριο 1 (β) για το Σενάριο 2.

Με βάση την υπολογισμένη τιμή ισοσκελισμού, η εξεταζόμενη διεργασία δεν μπορεί να χαρακτηριστεί, ως σαφώς οικονομικά βιώσιμη σε κανένα από τα δύο σενάρια. Η τιμή αυτή βρίσκεται πάνω από τις ενδεικτικές τιμές εμπορικών βιοδιεγερτικών βιολογικής προέλευσης που εντοπίζονται στην ελληνική αγορά (Πίνακας 37). Επιπλέον, επειδή η τιμή αυτή αντιστοιχεί σε τιμή ισοσκελισμού

της διεργασίας, η πραγματική τιμή πώλησης θα πρέπει να είναι ακόμη υψηλότερη ώστε να προκύπτει οικονομικό περιθώριο κέρδους. Συνεπώς, υπό τις παρούσες παραδοχές, η διεργασία εμφανίζεται οριακά έως μη ανταγωνιστική από οικονομική άποψη. Η οικονομική βιωσιμότητα θα μπορούσε να βελτιωθεί είτε μέσω μείωσης του κόστους παραγωγής είτε μέσω τεκμηρίωσης αυξημένης βιοδιεγερτικής αξίας, η οποία θα μπορούσε να δικαιολογήσει υψηλότερη τιμή διάθεσης.

Πίνακας 37: Πίνακας κόστους βιβλιογραφικής έρευνας για βιοδιεγερτικά λιπάσματα

Εμπορικό Προϊόν	Κόστος	Βιβλιογραφική πηγή
Βιοδιεγέρτης	$22.1 \text{ €} \, kg^{-1}$	Algafert Eco
Βιολογικός βιοδιεγέρτης	$26 \text{ €} \, kg^{-1}$	FarmClick
Λίπασμα με βιοδιεγερτικές ουσίες	$20.1 \text{ €} \, kg^{-1}$	Agrokoutentakis

Με βάση αποκλειστικά τα οικονομικά αποτελέσματα της παρούσας ανάλυσης, το Σενάριο 1 εμφανίζεται ευνοϊκότερο, καθώς παρουσιάζει χαμηλότερο συνολικό κόστος και χαμηλότερη τιμή ισοσκελισμού. Η αξιοποίηση του digestate, παρότι εξαλείφει το κόστος συμβατικών θρεπτικών και μειώνει την ενεργειακή κατανάλωση, εισάγει πρόσθετες απαιτήσεις προεπεξεργασίας, εργασίας, νερού και πάγιου εξοπλισμού. Επομένως, το βασικό πλεονέκτημα του Σεναρίου 2 δεν εντοπίζεται στις άμεσες οικονομικές επιδόσεις αλλά στην αξιοποίηση ενός υπολειμματικού ρεύματος και στην ανάκτηση θρεπτικών στο πλαίσιο της κυκλικής οικονομίας.

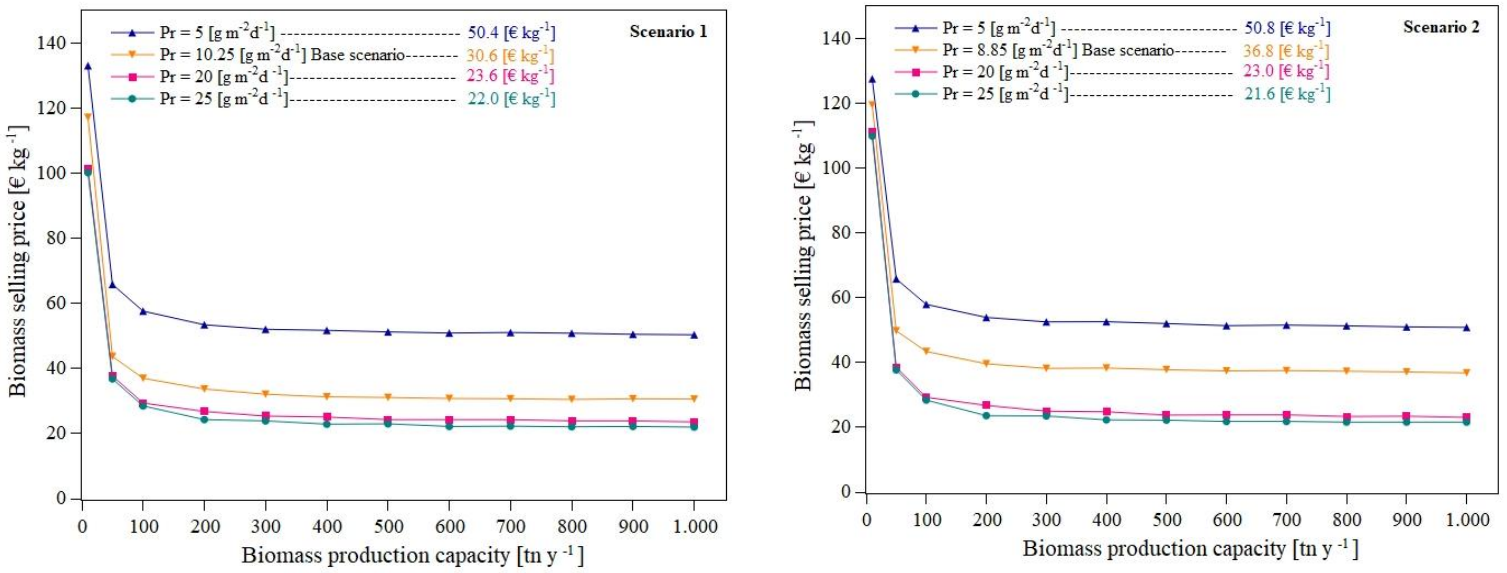
10.7 Ανάλυση ευαισθησιας

Η ανάλυση ευαισθησίας πραγματοποιείται προκειμένου να διερευνηθεί κατά πόσο η οικονομική βιωσιμότητα της διεργασίας επηρεάζεται από την παραγωγική δυναμικότητα της μονάδας και την παραγωγικότητα της καλλιέργειας. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται γιατί και στα δύο σενάρια η υπολογιζόμενη τιμή ισοσκελισμού της βιομάζας παραμένει σχετικά υψηλή. Επομένως, δεν αρκεί μόνο ο προσδιορισμός μιας τιμής πώλησης για τις αρχικές συνθήκες σχεδιασμού, αλλά απαιτείται να εξεταστεί κατά πόσο η αύξηση της κλίμακας παραγωγής ή η βελτίωση της απόδοσης της καλλιέργειας μπορούν να μειώσουν το μοναδιαίο κόστος παραγωγής και την ελάχιστη τιμή πώλησης του προϊόντος (Διάγραμμα 10.4).

Η ανάλυση είχε ως βάση μία συγκεκριμένη παραγωγικότητα στα δύο σενάρια που ήταν διαφορετική. Αναλυτικότερα, στο Σενάριο 1 η αρχική βάση παραγωγικότητα ήταν $10.25 \; g \; m^{-2} \; d^{-1}$ ενώ στο Σενάριο 2 $8.85 \; g \; m^{-2} \; d^{-1}$. Για αυτό θεωρείται απαραίτητη η βάση της ίδιας παραγωγικότητας για να αποφανθούμε ποιο σενάριο είναι βέλτιστο στην συγκεκριμένη διεργασία και αν είναι οικονομικά βιώσιμο. Για ίση παραγωγικότητα $20 \; g \; m^{-2} \; d^{-1}$ η ελάχιστη τιμή ισοσκελισμού για την μέγιστη δυναμικότητα και για τα δύο Σενάρια είναι $23.6 \text{ €} \, kg^{-1}$ και $23 \text{ €} \, kg^{-1}$. Συνεπώς, η υψηλότερη τιμή του Σεναρίου 2 στη βασική περίπτωση αποδίδεται κυρίως στη χαμηλότερη παραγωγικότητά του και όχι στην ίδια τη χρήση του digestate. Μάλιστα, η τιμή break- even προσεγγίζει το εύρος αυτό και από χαμηλότερη δυναμικότητα $(500 \; tn \; year^{-1})$ ενώ η απαιτούμενη επιφάνεια του ORP και στα δύο αυτά σενάρια είναι $115{,}741 \; m^2$. Για την Ελλάδα ειδικά, μια τέτοια συνολική επιφάνεια δεν είναι τελείως παράλογη, καθώς πρόσφατη ελληνική τεχνοοικονομική μελέτη χαρακτηρίζει την υψηλή ηλιακή ακτινοβολία και το θερμό μεσογειακό κλίμα της Ελλάδας ευνοϊκά για συστήματα open raceway και εξετάζει εγκατάσταση συνολικής έκτασης $13{,}5 - 18{,}4 \; ha$ (Dritsas et al., 2025). Άρα μια εγκατάσταση της τάξης αρκετών εκταρίων δεν είναι από μόνη της εξωπραγματική ως σχεδιαστικό μέγεθος.

Αντίστοιχα, για υψηλότερη παραγωγικότητα ίση με $25\ g\ m^{-2}\ d^{-1}$ η τιμή ισοσκελισμού προσεγγίζει την βιβλιογραφική τιμή πώλησης σε δυναμικότητα ίση με $200\ tn\ year^{-1}$ και συνολική επιφάνεια $55{,}555 m^2$. Ωστόσο στην συγκεκριμένη περίπτωση η φυσική εφικτότητα γίνεται πιο δύσκολη. διότι πρόσφατη ανάλυση μακροχρόνιας λειτουργίας open ponds αναφέρει ότι μέση ετήσια παραγωγικότητα τέτοιας κλίμακας δεν έχει ακόμη επιβεβαιωθεί στα διαθέσιμα πραγματικά δεδομένα και η υψηλότερη τιμή ήταν $22.5\ g\ m^{-2}\ d^{-1}$.

Συμπερασματικά, η αύξηση της παραγωγικότητας στα $20\ g\ m^{-2}\ d^{-1}$ μειώνει σημαντικά την απαιτούμενη επιφάνεια καλλιέργειας και οδηγεί την τιμή ισοσκελισμού κοντά στις βιβλιογραφικές τιμές ακόμη και σε δυναμικότητα $500\ t\ y^{-1}$. Η τιμή αυτή μπορεί να θεωρηθεί τεχνικά εφικτός αλλά απαιτητικός στόχος υπό ευνοϊκές μεσογειακές συνθήκες. Αντίθετα, τα $25\ g\ m^{-2}\ d^{-1}$ αποτελούν περισσότερο αισιόδοξο σενάριο, καθώς τέτοια μακροχρόνια μέση παραγωγικότητα δεν έχει ακόμη τεκμηριωθεί συστηματικά σε μεγάλης κλίμακας open raceway ponds στην συγκεκριμένη εγκατάσταση. Συνεπώς, η οικονομική βελτίωση που προκύπτει πρέπει να συνεκτιμηθεί με το πρόσθετο τεχνικό και λειτουργικό κόστος που ενδέχεται να απαιτείται για την επίτευξη τόσο υψηλών παραγωγικοτήτων.



(α) (β)

Διάγραμμα 10.4: : Επίδραση της παραγωγικότητας και της δυναμικότητας στην τιμή ισοσκελισμού της βιομάζας για (α) το Σενάριο 1 και (β) το Σενάριο 2.

11. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα εργασία έδειξε ότι η παραγωγή βιομάζας *Chlorella vulgaris* σε ανοικτή λίμνη τύπου raceway εντός θερμοκηπίου μπορεί να σχεδιαστεί ως ολοκληρωμένη διεργασία για την παραγωγή βιολιπάσματος. Ωστόσο, η οικονομική βιωσιμότητα της μονάδας εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την παραγωγικότητα, την δυναμικότητα και το κόστος των επιμέρους σταδίων καλλιέργειας και συγκομιδής. Από τη σύγκριση των δύο σεναρίων προκύπτει ότι η αξιοποίηση του digestate μειώνει την ανάγκη αγοράς συμβατικών θρεπτικών συστατικών και παράλληλα προσφέρει μία δυνατότητα αξιοποίησης ενός υπολείμματος της αναερόβιας χώνευσης. Παρ' όλα αυτά, η αυξημένη εξασθένηση της φωτεινής ακτινοβολίας στο καλλιεργητικό μέσο μειώνει την πραγματική παραγωγικότητα της καλλιέργειας και κατ' επέκταση την απαιτούμενη επιφάνεια εγκατάστασης.

Η αύξηση της κλίμακας της μονάδας μειώνει το μοναδιαίο κόστος παραγωγική δυναμικότητα αποτελεί επίσης κρίσιμη παράμετρο. Η αύξηση της κλίμακας της μονάδας οδηγεί σε σημαντική μείωση του μοναδιαίου κόστους παραγωγής, καθώς το πάγιο κόστος κατανέμεται σε μεγαλύτερη ποσότητα παραγόμενης βιομάζας αλλά μετά από ένα επίπεδο δυναμικότητας, η περαιτέρω αύξηση της παραγωγής προσφέρει σταδιακά μικρότερο οικονομικό όφελος. Συνεπώς, η επιλογή της δυναμικότητας δεν πρέπει να βασίζεται αποκλειστικά στη μεγιστοποίηση της παραγωγής, αλλά στο σημείο όπου η περαιτέρω αύξηση της κλίμακας δεν μειώνει ουσιαστικά την τιμή ισοσκελισμού.

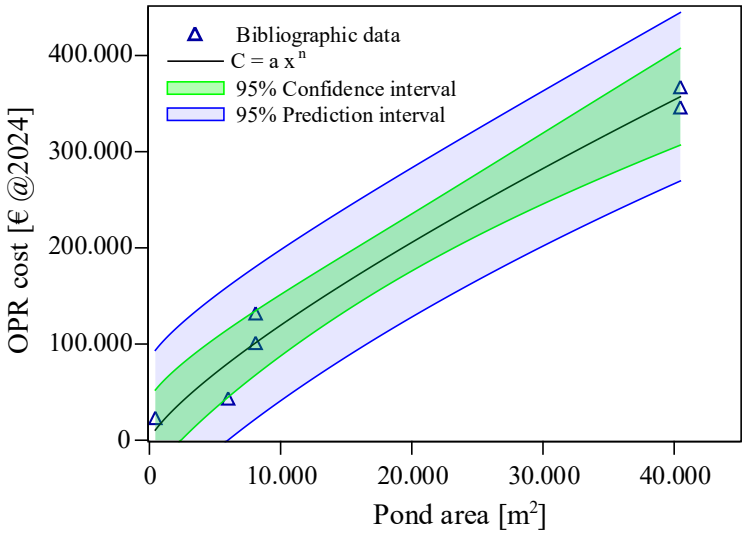
Ως σημαντικότερα στάδια από οικονομική άποψη αναδείχθηκαν η καλλιέργεια και η συγκομιδή της παραγόμενης βιομάζας. Αυτό υποδεικνύει ότι οι μελλοντικές προσπάθειες βελτιστοποίησης πρέπει να επικεντρωθούν κυρίως στην αύξηση της παραγωγικότητας ανά μονάδα επιφάνειας, στη βελτίωση της αξιοποίησης της διαθέσιμης ηλιακής ακτινοβολίας και στη μείωση του κόστους συγκομιδής και συμπύκνωσης. Παράλληλα, από ενεργειακή άποψη, το Σενάριο 1 εμφανίζει μεγαλύτερη ημερήσια κατανάλωση ενέργειας, ενώ το Σενάριο 2 χαρακτηρίζεται από υψηλότερο πάγιο κεφάλαιο και συνολικό κόστος παραγωγής λόγω της μεγαλύτερης απαιτούμενης εγκατάστασης και της πρόσθετης προεπεξεργασίας.

Τέλος, με βάση την υπολογισμένη τιμή ισοσκελισμού και τη σύγκρισή της με ενδεικτικές εμπορικές τιμές προϊόντων βιολιπασματικής και βιοδιεγερτικής δράσης, η εξεταζόμενη διεργασία δεν εμφανίζεται ακόμη σαφώς ανταγωνιστική. Η οικονομική της προοπτική μπορεί να βελτιωθεί κυρίως μέσω αύξησης της παραγωγικότητας σε εφαρμογές υψηλότερης προστιθέμενης αξίας. Συνεπώς, το βασικό περιθώριο βελτίωσης της διεργασίας βρίσκεται περισσότερο στην εντατικοποίηση και βελτιστοποίηση της παραγωγής παρά στην απλή αύξηση του μεγέθους της εγκατάστασης.

12. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

12.1 Εκτιμηση κοστουσ

12.1.1 Κατασκευή ανοιχτού αντιδραστήρα



Διάγραμμα 12.1: Συσχέτιση του κόστους κατασκευής ανοιχτής λίμνης τύπου raceway (ORP) με την επιφάνεια και προσαρμογή δυναμοσυνάρτησης.

Πίνακας 38: Παράμετροι και στατιστικά στοιχεία της προσαρμογής δυναμοσυνάρτησης για την εκτίμηση του κόστους κατασκευής ORP.

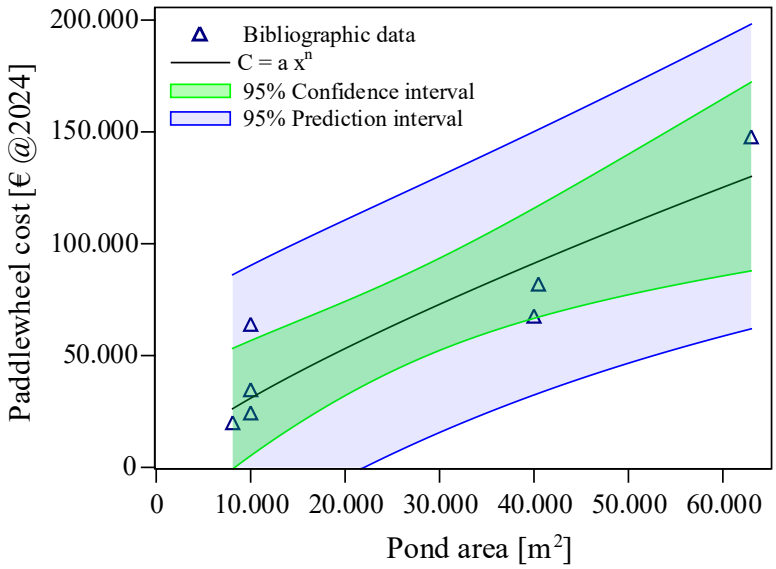
Cost coefficient, α [95%CI]	88.1 [-159.2 – 335.4]
Scaling exponent, n [95% CI]	0.783 [0.515 – 1.052]
R^2	0.98
RMSE [€]	25,820
Equation	$\frac{C}{€} = 88.1 \left(\frac{A}{m^2}\right)^{0.783}$
Capacity range [m^2]	450 – 40,470

Πίνακας 39:Βιβλιογραφικά δεδομένα κοστολόγησης αγοράς αντιδραστήρα

OPR	Επιφάνεια [m^2]	Κόστος [€]	Αναφορά
1	450	23,193	(Ryu et al., 2019)

2	6000	43,478	(Alavianghavanini et al., 2024)
3	8094	101,198	Microbiome 2-acre pond (Davis et al., 2016)
4	8094	131,984	Leidos 2-acre pond (Davis et al., 2016)
5	40470	367,199	Leidos 10-acre pond (Davis et al., 2016)
6	40470	346,155	GAI 10-acre pond (Davis et al., 2016)

12.1.2 Κόστος πτερυγίου (paddlewheel)



Διάγραμμα 12.2: Συσχέτιση του κόστους του paddlewheel με την επιφάνεια της λίμνης καλλιέργειας.

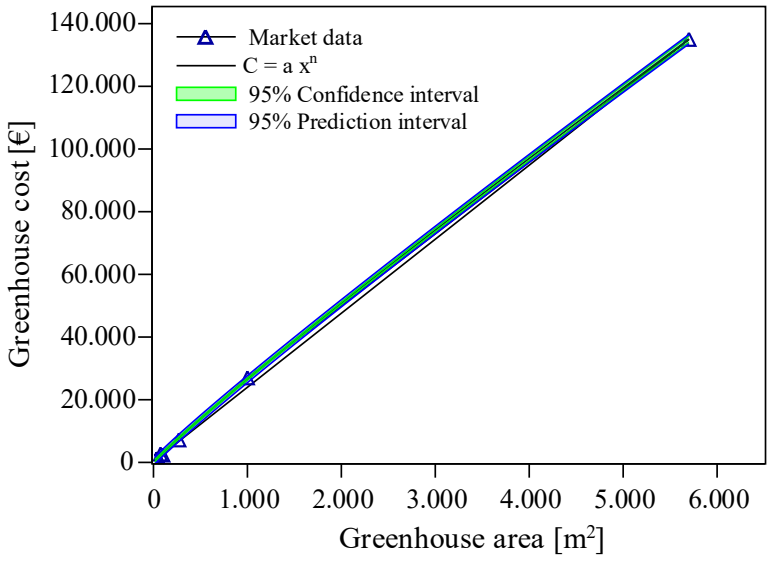
Πίνακας 40: Παράμετροι και στατιστικά στοιχεία της προσαρμογής δυναμοσυνάρτησης για την εκτίμηση του κόστους του paddlewheel.

Cost coefficient, α [95%CI]	23.4 [-106.7 – 153.6]
Scaling exponent, n [95% CI]	0.780 [0.260 – 1.300]
R^2	0.815
RMSE [€]	20,800
Equation	$\frac{C}{€} = 23.4 \left(\frac{A}{m^2}\right)^{0.780}$
Capacity range [m^2]	8,100 – 63,000

Πίνακας 41:Βιβλιογραφικά δεδομένα κόστους αγοράς πτερυγίου ανάδευσης

Πτερύγιο	Επιφάνεια OPR [m^2]	Κόστος [€ @2024]	Αναφορά
1	8,100	20,000	(Rogers et al., 2014b)
2	10,000	34,754	(Vulsteke et al., 2017)
3	10,000	24,380	(Agarwalla et al., 2025)
4	10,000	64,000	(Rossi et al., 2024)
5	40,000	67,646	Harris 10-acre pond (Davis et al., 2016)
6	40,469	81,985	Leidos 10-acre pond (Davis et al., 2016)
7	63,000	147,823	(Rossi et al., 2024)

12.1.3 Κόστος θερμοκηπίου



Διάγραμμα 12.3: Συσχέτιση του κόστους του θερμοκηπίου με την επιφάνεια του.

Πίνακας 42: Παράμετροι και στατιστικά στοιχεία της προσαρμογής δυναμοσυνάρτησης για την εκτίμηση του κόστους της κατασκευής του θερμοκηπίου.

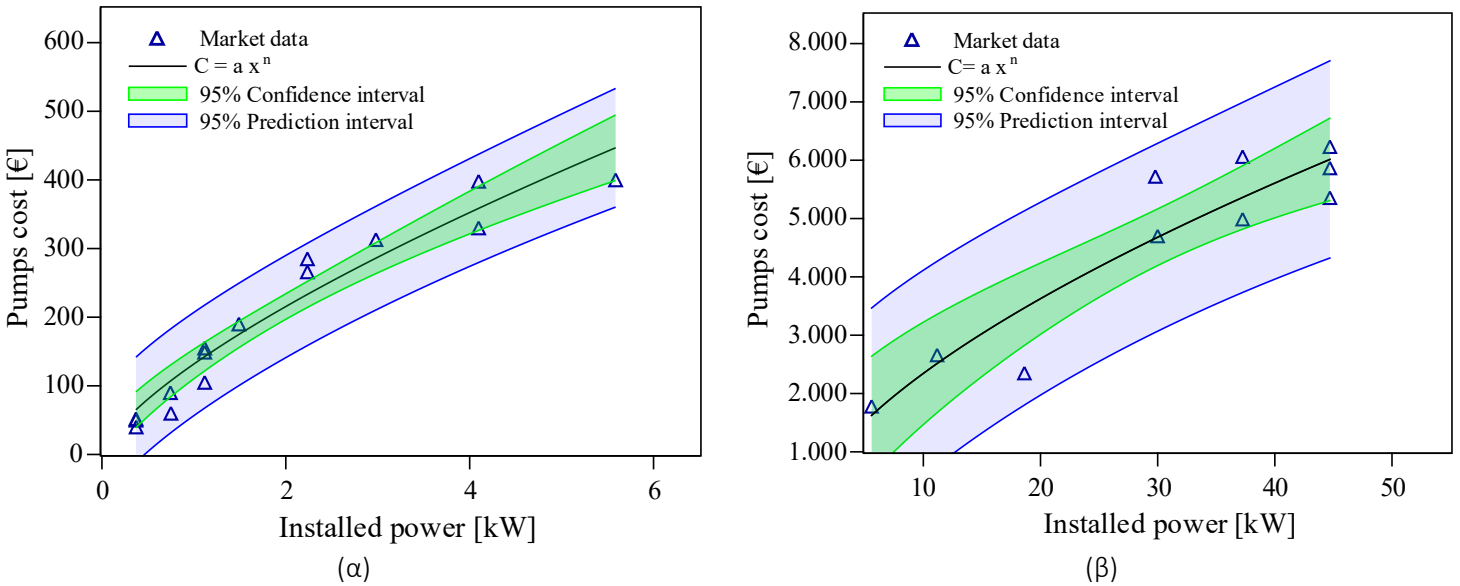
Cost coefficient, α [95%CI]	41.9 [34.9 – 48.9]

Scaling exponent, n [95% CI]	0.934 [0.915 – 0.954]
R^2	0.99
RMSE [€]	448.8
Equation	$\frac{C}{€} = 41.9 \left(\frac{A}{m^2}\right)^{0.934}$
Capacity range [m^2]	15 – 5,700

Πίνακας 43:Βιβλιογραφικά δεδομένα αγοράς θερμοκηπίου.

Θερμοκήπιο	Επιφάνεια [m^2]	Κόστος [€]
1	15	700
2	25	956
3	50	1,340
4	100	2,370
5	270	7,200
6	1000	27,000
7	5700	135,000

12.1.4 Κόστος αντλιών



Διάγραμμα 12.4: Συσχέτιση του κόστους φυγοκεντρικών αντλιών για (α) χαμηλή ισχύ και (β) για υψηλή ισχύ.

Πίνακας 44: Παράμετροι και στατιστικά στοιχεία της προσαρμογής δυναμοσυνάρτησης για την εκτίμηση του κόστους της κατασκευής των φυγοκεντρικών αντλιών.

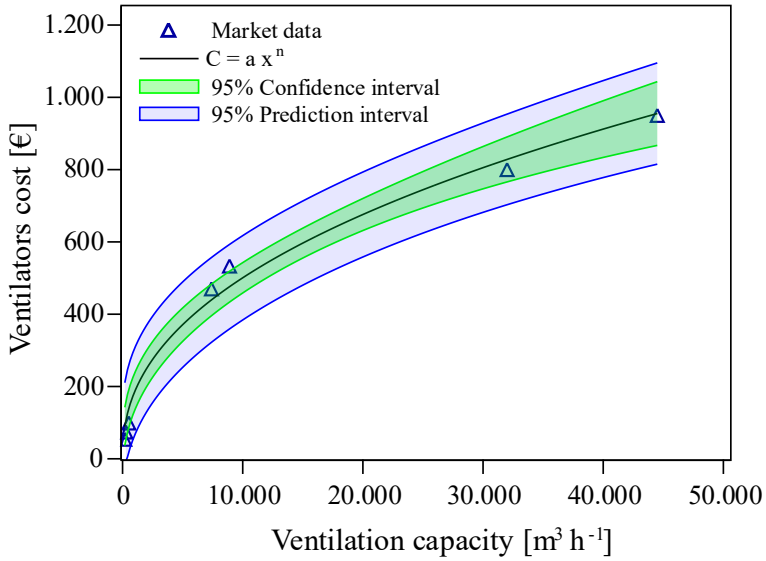
	Χαμηλής ισχύος	Υψηλής ισχύος
Cost coefficient, α [95%CI]	131.8 [108.8 – 154.6]	550.9 [-6.64 – 1108.4]
Scaling exponent, n [95% CI]	0.710 [0.575 – 0.845]	0.629 [0.347 – 0.911]
R^2	0.94	0.841
RMSE [€]	33.4	666.0
Equation	$\frac{C}{€} = 131.8 \left(\frac{P}{kW}\right)^{0.710}$	$\frac{C}{€} = 550.9 \left(\frac{P}{kW}\right)^{0.629}$
Capacity range [W]	0.37 – 5.59	5.59 – 44.70

Πίνακας 45: Βιβλιογραφικά δεδομένα κόστους αγοράς φυγοκεντρικών αντλιών.

Αντλίες	Ισχύς [kW]	Κόστος [€]
Χαμηλής ισχύος		
1	0.37	40
2	0.37	50
3	0.37	52
4	0.75	60
5	0.75	90
6	1.10	105
7	1.10	149
8	1.10	155
9	1.50	190
10	2.24	266
11	2.24	285
12	3.00	313
13	4.10	330
14	4.10	398
15	5.60	400
Υψηλής ισχύος		

1	5.60	1,780
2	11.18	2,660
3	18.63	2,350
4	29.80	5,721
	30	4700
5	37.25	4,989
6	37.25	6,061
7	44.70	5,356
8	44.70	5,866
	44.70	6,231

12.1.5 Κόστος συστήματος εξαερισμού



Διάγραμμα 12.5: Συσχέτιση του κόστους του συστήματος εξαερισμού με την ογκομετρική του παροχή.

Πίνακας 46: Παράμετροι και στατιστικά στοιχεία της προσαρμογής δυναμοσυνάρτησης για την εκτίμηση του κόστους της κατασκευής του συστήματος εξαερισμού.

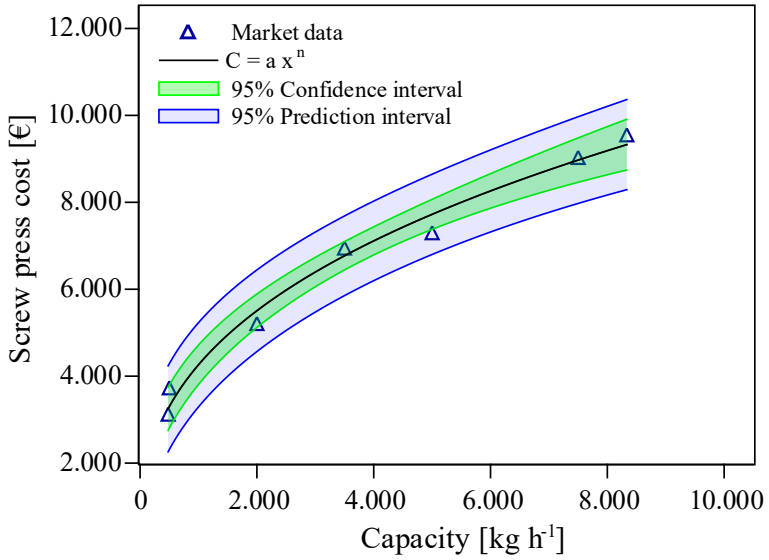
Cost coefficient, α [95%CI]	9.3 [1.1 – 17.5]
Scaling exponent, n [95% CI]	0.433 [0.346 – 0.519]
R^2	0.99
RMSE [€]	42.3

Equation	$\frac{C}{€} = 9.3\left(\frac{Q}{m^3 h^{-1}}\right)^{0.433}$
Capacity range [m^3 h^{-1}]	187 – 44,500

Πίνακας 47:Βιβλιογραφικά δεδομένα για την κοστολόγηση συστήματος αερισμού

Σύστημα εξαερισμού	Παροχή [m^3 h^{-1}]	Κόστος [€]
1	187	54
2	280	74
3	520	99
4	7400	470
5	8900	533
6	32000	800
7	44500	950

12.1.6 Κόστος Screw press



Διάγραμμα 12.6: Συσχέτιση του κόστους του Screw press με την μαζική του παροχή.

Πίνακας 48: Παράμετροι και στατιστικά στοιχεία της προσαρμογής δυναμοσυνάρτησης για την εκτίμηση του κόστους της κατασκευής του Screw press..

Cost coefficient, α [95%CI]	332.1 [152.9 – 511.2]

Scaling exponent, n [95% CI]	0.369 [0.306 – 0.433]
R^2	0.99
RMSE [€]	333.2
Equation	$\frac{C}{€} = 332.1\left(\frac{Q}{kg\ h^{-1}}\right)^{0.369}$
Capacity range [kg h^{-1}]	480 – 8,333

Πίνακας 49:Βιβλιογραφικά δεδομένα για την κοστολόγηση αγοράς Screw press

Screw press	Παροχή [kg h^{-1}]	Κόστος [€]
1	480	3,126
2	500	3,732
3	2000	5,211
4	3500	6,948
5	5000	7,300
6	7500	9,032
7	8333.3	9,553

13. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Abdur Razzak, S., Bahar, K., Islam, K. M. O., Haniffa, A. K., Faruque, M. O., Hossain, S. M. Z., & Hossain, M. M. (2024a). Microalgae cultivation in photobioreactors: sustainable solutions for a greener future. In *Green Chemical Engineering* (Vol. 5, Number 4, pp. 418–439). KeAi Communications Co. https://doi.org/10.1016/j.gce.2023.10.004

Abdur Razzak, S., Bahar, K., Islam, K. M. O., Haniffa, A. K., Faruque, M. O., Hossain, S. M. Z., & Hossain, M. M. (2024b). Microalgae cultivation in photobioreactors: sustainable solutions for a greener future. In *Green Chemical Engineering* (Vol. 5, Number 4, pp. 418–439). KeAi Communications Co. https://doi.org/10.1016/j.gce.2023.10.004

Abu-Hamdeh, N. H. (2003). Thermal properties of soils as affected by density and water content. *Biosystems Engineering*, *86*(1), 97–102. https://doi.org/10.1016/S1537-5110(03)00112-0

Agarwalla, A., Kumar, V., & Mohanty, K. (2025). *Techno-Economic Analysis of an Integrated Membrane-Based Harvesting and Effluent Recycling Strategy for Microalgal Biomass Production in Raceway Ponds Scenario 1 (S1: 1 Ha with Subsidized Electricity)*. https://doi.org/https://doi.org/10.1021/acsestwater.5c00790

Agbede, O. O., Oke, E. O., Akinfenwa, S. I., Wahab, K. T., Ogundipe, S., Aworanti, O. A., Arinkoola, A. O., Agarry, S. E., Ogunleye, O. O., Osuolale, F. N., & Babatunde, K. A. (2020a). Thin layer drying of green microalgae (Chlorella sp.) paste biomass: Drying characteristics, energy requirement and mathematical modeling. *Bioresource Technology Reports*, *11*. https://doi.org/10.1016/j.biteb.2020.100467

Agbede, O. O., Oke, E. O., Akinfenwa, S. I., Wahab, K. T., Ogundipe, S., Aworanti, O. A., Arinkoola, A. O., Agarry, S. E., Ogunleye, O. O., Osuolale, F. N., & Babatunde, K. A. (2020b). Thin layer drying of green microalgae (Chlorella sp.) paste biomass: Drying characteristics, energy requirement and mathematical modeling. *Bioresource Technology Reports*, *11*, 100467. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biteb.2020.100467

Ahmad, M. T., Shariff, M., Md. Yusoff, F., Goh, Y. M., & Banerjee, S. (2020). Applications of microalga Chlorella vulgaris in aquaculture. In *Reviews in Aquaculture* (Vol. 12, Number 1, pp. 328–346). Wiley-Blackwell. https://doi.org/10.1111/raq.12320

Alavianghavanini, A. (2024). *Feasibility of microalgal treatment of abattoir anaerobic digestion effluent for the production of value-added products*.

Alavianghavanini, A., Moheimani, N. R., & Bahri, P. A. (2024). Process design and economic analysis for the production of microalgae from anaerobic digestates in open raceway ponds. *Science of the Total Environment*, *923*. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171554

Álvarez-González, A., Uggetti, E., Serrano, L., Gorchs, G., Ferrer, I., & Díez-Montero, R. (2022). Can microalgae grown in wastewater reduce the use of inorganic fertilizers? *Journal of Environmental Management*, *323*. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116224

Andersen, R. A. (1992). Diversity of eukaryotic algae. In *Biodiversity and Conservation* (Vol. 1).

Arahou, F., Hassikou, R., Arahou, M., Rhazi, L., & Wahby, I. (2021). Influence of culture conditions on Arthrospira platensis growth and valorization of biomass as input for sustainable agriculture. *Aquaculture International*, *29*(5), 2009–2020. https://doi.org/10.1007/s10499-021-00730-5

Arashiro, L. T., Montero, N., Ferrer, I., Acién, F. G., Gómez, C., & Garfí, M. (2018). Life cycle assessment of high rate algal ponds for wastewater treatment and resource recovery. *Science of the Total Environment*, *622*, 1118–1130.

Austin, C., & Biotechnol Bioeng, J. (2021). Citation: Filali R,Tian H, Michiels E and Taidi B. Evaluation of the Growth Performance of Microalgae Based on. In *Austin J Biotechnol Bioeng* (Vol. 8, Number 1). www.austinpublishinggroup.com

Azmi, A. S., Aziz, N. A. C., Puad, N. I. M., Halim, A. A., Yusof, F., & Yusup, S. (2018). Chlorella vulgaris logistic growth kinetics model in high concentrations of aqueous ammonia. *IIUM Engineering Journal*, *19*(2), 1–9. https://doi.org/10.31436/iiumej.v19.i2.893

Banerjee, S., & Ramaswamy, S. (2019). Comparison of productivity and economic analysis of microalgae cultivation in open raceways and flat panel photobioreactor. *Bioresource Technology Reports*, *8*. https://doi.org/10.1016/j.biteb.2019.100328

Barnett, A., Méléder, V., Blommaert, L., Lepetit, B., Gaudin, P., Vyverman, W., Sabbe, K., Dupuy, C., & Lavaud, J. (2015). Growth form defines physiological photoprotective capacity in intertidal benthic diatoms. *ISME Journal*, *9*(1), 32–45. https://doi.org/10.1038/ismej.2014.105

Béchet, Q., Shilton, A., Park, J. B. K., Craggs, R. J., & Guieysse, B. (2011). Universal temperature model for shallow algal ponds provides improved accuracy. *Environmental Science and Technology*, *45*(8), 3702–3709. https://doi.org/10.1021/es1040706

Belohlav, V., & Jirout, T. (2019). Design methodology of industrial equipment for microalgae biomass primary harvesting and dewatering. *Chemical Engineering Transactions*, *76*, 919–924. https://doi.org/10.3303/CET1976154

Benson, B. C., & Rusch, K. A. (2006). Investigation of the light dynamics and their impact on algal growth rate in a hydraulically integrated serial turbidostat algal reactor (HISTAR). *Aquacultural Engineering*, *35*(2), 122–134. https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2005.09.005

Bhatt, A., Khanchandani, M., Rana, M. S., & Prajapati, S. K. (2022). Techno-economic analysis of microalgae cultivation for commercial sustainability: A state-of-the-art review. In *Journal of Cleaner Production* (Vol. 370). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133456

Bolzonella, D., Fatone, F., Gottardo, M., & Frison, N. (2018). Nutrients recovery from anaerobic digestate of agro-waste: Techno-economic assessment of full scale applications. *Journal of Environmental Management*, *216*, 111–119. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.08.026

Borowitzka, M. A., & Vonshak, A. (2017). Scaling up microalgal cultures to commercial scale. *European Journal of Phycology*, *52*(4), 407–418. https://doi.org/10.1080/09670262.2017.1365177

Braun, J. C. A., & Colla, L. M. (2023). Use of Microalgae for the Development of Biofertilizers and Biostimulants. In *Bioenergy Research* (Vol. 16, Number 1, pp. 289–310). Springer. https://doi.org/10.1007/s12155-022-10456-8

Brennan, L., & Owende, P. (2010). Biofuels from microalgae-A review of technologies for production, processing, and extractions of biofuels and co-products. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 14, Number 2, pp. 557–577). https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.10.009

Castro-Muñoz, R., & García-Depraect, O. (2021). Membrane-based harvesting processes for microalgae and their valuable-related molecules: A review. In *Membranes* (Vol. 11, Number 8). MDPI AG. https://doi.org/10.3390/membranes11080585

Cathcart, A., Smyth, B. M., Lyons, G., Murray, S. T., Rooney, D., & Johnston, C. R. (2023). Optimising mechanical separation of anaerobic digestate for total solids and nutrient removal. *Journal of Environmental Management*, *345*. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118449

Chiaramonti, D., Prussi, M., Casini, D., Tredici, M. R., Rodolfi, L., Bassi, N., Zittelli, G. C., & Bondioli, P. (2013). Review of energy balance in raceway ponds for microalgae cultivation: Re-thinking a traditional system is possible. *Applied Energy*, *102*, 101–111.

Colla, G., & Rouphael, Y. (2020). Microalgae: New Source of Plant Biostimulants. In *Agronomy* (Vol. 10, Number 9). MDPI AG. https://doi.org/10.3390/agronomy10091240

Connors, K. A., Arndt, D., Rawlings, J. M., Brun Hansen, A. M., Lam, M. W., Sanderson, H., & Belanger, S. E. (2023). Environmental hazard of cationic polymers relevant in personal and consumer care

products: A critical review. In *Integrated Environmental Assessment and Management* (Vol. 19, Number 2, pp. 312–325). John Wiley and Sons Inc. https://doi.org/10.1002/ieam.4642

Cunha, P., Pereira, H., Costa, M., Pereira, J., Silva, J. T., Fernandes, N., Varela, J., Silva, J., & Simões, M. (2020). Nannochloropsis oceanica cultivation in pilot-scale raceway ponds-from design to cultivation. *Applied Sciences (Switzerland)*, *10*(5). https://doi.org/10.3390/app10051725

Dall'Osto, L., Cazzaniga, S., Guardini, Z., Barera, S., Benedetti, M., Mannino, G., Maffei, M. E., & Bassi, R. (2019). Combined resistance to oxidative stress and reduced antenna size enhance light-to-biomass conversion efficiency in Chlorella vulgaris cultures. *Biotechnology for Biofuels*, *12*. https://doi.org/10.1186/s13068-019-1566-9

Darvehei, P., Bahri, P. A., & Moheimani, N. R. (2018). Model development for the growth of microalgae: A review. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 97, pp. 233–258). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.08.027

Davis, R., Markham, J., Kinchin, C., Grundl, N., Tan, E. C. D., & Humbird, D. (2016a). *Process design and economics for the production of algal biomass: algal biomass production in open pond systems and processing through dewatering for downstream conversion*. NREL (National Renewable Energy Laboratory (NREL), Golden, CO (United States)).

Davis, R., Markham, J., Kinchin, C., Grundl, N., Tan, E. C. D., & Humbird, D. (2016b). *Process Design and Economics for the Production of Algal Biomass: Algal Biomass Production in Open Pond Systems and Processing Through Dewatering for Downstream Conversion*. www.nrel.gov/publications.

Di Caprio, F., Proietti Tocca, G., Stoller, M., Pagnanelli, F., & Altimari, P. (2022). Control of bacterial contamination in microalgae cultures integrated with wastewater treatment by applying feast and famine conditions. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, *10*(5). https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.108262

Dias, R. R., Deprá, M. C., de Menezes, C. R., Zepka, L. Q., & Jacob-Lopes, E. (2025). Microalgae Cultivation in Wastewater: How Realistic Is This Approach for Value-Added Product Production? In *Processes* (Vol. 13, Number 7). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). https://doi.org/10.3390/pr13072052

Dolganyuk, V., Belova, D., Babich, O., Prosekov, A., Ivanova, S., Katserov, D., Patyukov, N., & Sukhikh, S. (2020). Microalgae: A promising source of valuable bioproducts. In *Biomolecules* (Vol. 10, Number 8, pp. 1–24). MDPI AG. https://doi.org/10.3390/biom10081153

Drexler, I. L. C., & Yeh, D. H. (2014). Membrane applications for microalgae cultivation and harvesting: a review. In *Reviews in Environmental Science and Biotechnology* (Vol. 13, Number 4, pp. 487–504). Kluwer Academic Publishers. https://doi.org/10.1007/s11157-014-9350-6

Dritsas, P., Patsialou, S., Kampantais, D., Roussos, E., Kotzamanis, Y., Tekerlekopoulou, A., Vayenas, D. V., & Aggelis, G. (2025). Investigating the Potential of Newly Isolated Microalgae Strains from the Ionian Sea (Greece) Cultured in an Open Raceway Pond. *Applied Sciences (Switzerland)*, *15*(12). https://doi.org/10.3390/app15126680

Farag, I., & Price, K. (2013). Resources Conservation in Microalgae Biodiesel Production. *International Journal of Engineering and Technical Research*, *1*(8). www.erpublication.org

Farvardin, M., Taki, M., Gorjian, S., Shabani, E., & Sosa-Savedra, J. C. (2024). Assessing the Physical and Environmental Aspects of Greenhouse Cultivation: A Comprehensive Review of Conventional and Hydroponic Methods. *Sustainability (Switzerland)*, *16*(3). https://doi.org/10.3390/su16031273

Fasaei, F., Bitter, J. H., Slegers, P. M., & van Boxtel, A. J. B. (2018). Techno-economic evaluation of microalgae harvesting and dewatering systems. *Algal Research*, *31*, 347–362. https://doi.org/10.1016/j.algal.2017.11.038

Fasaei, F., Bitter, J. H., Slegers, P. M., & Van Boxtel, A. J. B. (2018). Techno-economic evaluation of microalgae harvesting and dewatering systems. *Algal Research*, *31*, 347–362.

Fatnassi, H., Errais, R., & Poncet, C. (2025). Optimizing greenhouse design for enhanced microalgae production: A CFD Analysis of microclimate and water thermal dynamics in raceway ponds. *Ecological Modelling*, *499*. https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2024.110946

Gonçalves, J., Freitas, J., Fernandes, I., & Silva, P. (2023). Microalgae as Biofertilizers: A Sustainable Way to Improve Soil Fertility and Plant Growth. In *Sustainability (Switzerland)* (Vol. 15, Number 16). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). https://doi.org/10.3390/su151612413

Guiry, M. D. (2012). How many species of algae are there? In *Journal of Phycology* (Vol. 48, Number 5, pp. 1057–1063). https://doi.org/10.1111/j.1529-8817.2012.01222.x

Hall, C., Lo, G. J., & Hamilton, A. (2024). Water vapour permeability of inorganic construction materials. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, *57*(2). https://doi.org/10.1617/s11527-023-02281-y

Harjunowibowo, D., Ding, Y., Omer, ; Siddig, & Riffat, ; Saffa. (2018). Agricultural Academy. In *Bulgarian Journal of Agricultural Science* (Vol. 24, Number 1).

He, H., Chen, X., Peng, Z., Zhang, Z., Ren, X., Ma, S., Khan, M. U., Cui, Z., & Yuan, X. (2025). A review of temperature and key parameters influencing the hydrolysis-methanogenesis balance in anaerobic digestion. In *Fuel* (Vol. 394). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2025.134927

Heining, M., & Buchholz, R. (2015). Photobioreactors with internal illumination - A survey and comparison. In *Biotechnology Journal* (Vol. 10, Number 8, pp. 1131–1137). Wiley-VCH Verlag. https://doi.org/10.1002/biot.201400572

Herout, M., Malaťák, J., Kučera, L., & Dlabaja, T. (2011). *Biogas composition depending on the type of plant biomass used*. https://doi.org/10.17221/41/2010-RAE

Hossain, N., & Mahlia, T. M. I. (2019). Progress in physicochemical parameters of microalgae cultivation for biofuel production. In *Critical Reviews in Biotechnology* (Vol. 39, Number 6, pp. 835–859). Taylor and Francis Ltd. https://doi.org/10.1080/07388551.2019.1624945

Huang, Y., Luo, L., Xu, K., & Wang, X. C. (2019). Characteristics of external carbon uptake by microalgae growth and associated effects on algal biomass composition. *Bioresource Technology*, *292*. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121887

Jareonsin, S., & Pumas, C. (2021). Advantages of Heterotrophic Microalgae as a Host for Phytochemicals Production. In *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology* (Vol. 9). Frontiers Media S.A. https://doi.org/10.3389/fbioe.2021.628597

Jia, F., Kacira, M., & Ogden, K. L. (2015). Multi-wavelength based optical density sensor for autonomous monitoring of microalgae. *Sensors (Switzerland)*, *15*(9), 22234–22248. https://doi.org/10.3390/s150922234

Juneja, A., Ceballos, R. M., & Murthy, G. S. (2013). Effects of environmental factors and nutrient availability on the biochemical composition of algae for biofuels production: A review. In *Energies* (Vol. 6, Number 9, pp. 4607–4638). MDPI AG. https://doi.org/10.3390/en6094607

Kalinina, A., Naumov, V., Verakhina, A., Ovchinnikova, S., Yakovleva, D., Dobrov, A., Sokolova, T., Lukyanova, J., & Afanasieva, P. (2023). Study of the Influence of the Temperature and Time of Microalgae Cultivation on the Reproduction Rate of Chlorella and Scenedesmus Microalgae When Cultured in a Tubular Photobioreactor. *Microbiology Research*, *14*(4), 2105–2112. https://doi.org/10.3390/microbiolres14040142

Kim, T. H., Lee, Y., Han, S. H., & Hwang, S. J. (2013). The effects of wavelength and wavelength mixing ratios on microalgae growth and nitrogen, phosphorus removal using Scenedesmus sp. for wastewater treatment. *Bioresource Technology*, *130*, 75–80. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.11.134

Kratzer, R., & Murkovic, M. (2021). *Food Ingredients and Nutraceuticals from Microalgae: Main Product Classes and Biotechnological Production*. https://doi.org/10.3390/foods

Lee, E., Jalalizadeh, M., & Zhang, Q. (2015). Growth kinetic models for microalgae cultivation: A review. In *Algal Research* (Vol. 12, pp. 497–512). Elsevier. https://doi.org/10.1016/j.algal.2015.10.004

Liang, Y., Yu, X. H., Anaokar, S., Shi, H., Dahl, W. B., Cai, Y., Luo, G., Chai, J., Cai, Y., Mollá-Morales, A., Altpeter, F., Ernst, E., Schwender, J., Martienssen, R. A., & Shanklin, J. (2023). Engineering triacylglycerol accumulation in duckweed (Lemna japonica). *Plant Biotechnology Journal*, *21*(2), 317–330. https://doi.org/10.1111/pbi.13943

Magdaong, J. B., Ubando, A. T., Culaba, A. B., Chang, J. S., & Chen, W. H. (2019). Effect of aeration rate and light cycle on the growth characteristics of Chlorella sorokiniana in a photobioreactor. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *268*(1). https://doi.org/10.1088/1755-1315/268/1/012112

Maltsev, Y., Maltseva, K., Kulikovskiy, M., & Maltseva, S. (2021). Influence of light conditions on microalgae growth and content of lipids, carotenoids, and fatty acid composition. In *Biology* (Vol. 10, Number 10). MDPI. https://doi.org/10.3390/biology10101060

Matjuda, D. S., Tekere, M., & Thaela-Chimuka, M. J. (2023). Characterization of the physicochemical composition of anaerobically digested (digestate) high throughput red meat abattoir waste in South Africa and the determination of its quality as a potential biofertilizer. *Heliyon*, *9*(11). https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e21647

McCartney, L., Orsat, V., & Lefsrud, M. G. (2018). An experimental study of the cooling performance and airflow patterns in a model Natural Ventilation Augmented Cooling (NVAC) greenhouse. *Biosystems Engineering*, *174*, 173–189. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2018.07.005

Meegoda, J. N., Li, B., Patel, K., & Wang, L. B. (2018). A review of the processes, parameters, and optimization of anaerobic digestion. In *International Journal of Environmental Research and Public Health* (Vol. 15, Number 10). MDPI AG. https://doi.org/10.3390/ijerph15102224

Menzel, T., Neubauer, P., & Junne, S. (2020). Role of microbial hydrolysis in anaerobic digestion. In *Energies* (Vol. 13, Number 21). MDPI AG. https://doi.org/10.3390/en13215555

Meteoblue. (2026, May). *Average Temperatures and Precipitation*.

Misra, D., & Ghosh, S. (2017). Performance study of a floricultural greenhouse surrounded by shallow water ponds. *International Journal of Renewable Energy Development*, *6*(2), 137–144. https://doi.org/10.14710/ijred.6.2.137-144

Moon, J., Park, Y. J., Choi, Y. Bin, Truong, T. Q., Huynh, P. K., Kim, Y. B., & Kim, S. M. (2024). Physiological Effects and Mechanisms of Chlorella vulgaris as a Biostimulant on the Growth and Drought Tolerance of Arabidopsis thaliana. *Plants*, *13*(21). https://doi.org/10.3390/plants13213012

Park, J. B. K., Craggs, R. J., & Shilton, A. N. (2011). Wastewater treatment high rate algal ponds for biofuel production. *Bioresource Technology*, *102*(1), 35–42.

Parmar, P., Kumar, R., Neha, Y., & Srivatsan, V. (2023). Microalgae as next generation plant growth additives: Functions, applications, challenges and circular bioeconomy based solutions. In *Frontiers in Plant Science* (Vol. 14). Frontiers Media S.A. https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1073546

Perez-Garcia, O., Escalante, F. M. E., de-Bashan, L. E., & Bashan, Y. (2011). Heterotrophic cultures of microalgae: Metabolism and potential products. In *Water Research* (Vol. 45, Number 1, pp. 11–36). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.watres.2010.08.037

Qiu, R., Gao, S., Lopez, P. A., & Ogden, K. L. (2017). Effects of pH on cell growth, lipid production and CO2 addition of microalgae Chlorella sorokiniana. *Algal Research*, *28*, 192–199. https://doi.org/10.1016/j.algal.2017.11.004

Ras, M., Steyer, J. P., & Bernard, O. (2013). Temperature effect on microalgae: A crucial factor for outdoor production. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, *12*(2), 153–164. https://doi.org/10.1007/s11157-013-9310-6

Ren, S., Shao, C., Zhu, F., Schagerl, M., Hu, X., Sobhi, M., Xu, L., Qian, J., & Huo, S. (2025). Optimization and synergistic enhancement of microalgae productivity in laboratory raceway ponds via co-regulation of automated light-supplemented mixers and electric field system. *Biotechnology for Biofuels and Bioproducts*, *18*(1). https://doi.org/10.1186/s13068-025-02658-x

Richmond, A. (1992). Open systems for the mass production of photoautotrophic microalgae outdoors: physiological principles. In *Journal of Applied Phycology* (Vol. 4).

Rogers, J. N., Rosenberg, J. N., Guzman, B. J., Oh, V. H., Mimbela, L. E., Ghassemi, A., Betenbaugh, M. J., Oyler, G. A., & Donohue, M. D. (2014a). A critical analysis of paddlewheel-driven raceway ponds for algal biofuel production at commercial scales. *Algal Research*, *4*, 76–88.

Rogers, J. N., Rosenberg, J. N., Guzman, B. J., Oh, V. H., Mimbela, L. E., Ghassemi, A., Betenbaugh, M. J., Oyler, G. A., & Donohue, M. D. (2014b). A critical analysis of paddlewheel-driven raceway ponds for algal biofuel production at commercial scales. *Algal Research*, *4*(1), 76–88. https://doi.org/10.1016/j.algal.2013.11.007

Ronga, D., Biazzi, E., Parati, K., Carminati, D., Carminati, E., & Tava, A. (2019). Microalgal biostimulants and biofertilisers in crop productions. In *Agronomy* (Vol. 9, Number 4). MDPI AG. https://doi.org/10.3390/agronomy9040192

Rossi, S., Carecci, D., & Ficara, E. (2023). Thermal response analysis and compilation of cardinal temperatures for 424 strains of microalgae, cyanobacteria, diatoms and other species. In *Science of the Total Environment* (Vol. 873). Elsevier B.V. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162275

Rossi, S., Carecci, D., Marazzi, F., Di Benedetto, F., Mezzanotte, V., Parati, K., Alberti, D., Geraci, I., & Ficara, E. (2024). Integrating microalgae growth in biomethane plants: Process design, modelling, and cost evaluation. *Heliyon*, *10*(1). https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e23240

Ruiz, J., Wijffels, R. H., Dominguez, M., & Barbosa, M. J. (2022). Heterotrophic vs autotrophic production of microalgae: Bringing some light into the everlasting cost controversy. *Algal Research*, *64*. https://doi.org/10.1016/j.algal.2022.102698

Ryu, K. H., Lee, J. Y., Ngmin Heo, S., & Lee, J. H. (2019). *Supporting information Improved microalgae production by using a heat supplied open raceway pond*. https://doi.org/https://doi.org/10.1021/acs.iecr.9b00986

Salazar, Augusto., & Rios, Ismael. (2010). *Sustainable agriculture : technology, planning and management*. Nova Science Publishers, Inc.

Sapounas, A., Katsoulas, N., Slager, B., Bezemer, R., & Lelieveld, C. (2020). Design, control, and performance aspects of semi-closed greenhouses. In *Agronomy* (Vol. 10, Number 11). MDPI AG. https://doi.org/10.3390/agronomy10111739

Sawant, S. S., Gosavi, S. N., Khadamkar, H. P., Mathpati, C. S., Pandit, R., & Lali, A. M. (2019a). Energy efficient design of high depth raceway pond using computational fluid dynamics. *Renewable Energy*, *133*, 528–537. https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.10.016

Sawant, S. S., Gosavi, S. N., Khadamkar, H. P., Mathpati, C. S., Pandit, R., & Lali, A. M. (2019b). Energy efficient design of high depth raceway pond using computational fluid dynamics. *Renewable Energy*, *133*, 528–537. https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.10.016

Seelam, J. S., Fernandes de Souza, M., Chaerle, P., Willems, B., Michels, E., Vyverman, W., & Meers, E. (2022). Maximizing nutrient recycling from digestate for production of protein-rich microalgae for animal feed application. *Chemosphere*, *290*. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.133180

Seider, Seader, Lewin, & Widalgdo. (2009). *Product and Process Design Principles Synthesis, Analysis and Evaluation* (3rd ed.). Donald Fowley.

Shi, X., Zhang, R., Sand, W., Mathivanan, K., Zhang, Y., Wang, N., Duan, J., & Hou, B. (2023). Comprehensive Review on the Use of Biocides in Microbiologically Influenced Corrosion. In *Microorganisms* (Vol. 11, Number 9). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). https://doi.org/10.3390/microorganisms11092194

Shuhaili, F., Segura-Noguera, M., Mathumathy, Vijayaraghavan, R., Thilagar, S., Lakshmanan, U., Prabaharan, D., & Vaidyanathan, S. (2023). Nitrate and phosphate uptake dynamics in two halotolerant strains of Chlorella vulgaris is differentially influenced by carbon, nitrogen and phosphorus supply. *Chemical Engineering Journal*, *458*. https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.141433

Singh, S. P., & Singh, P. (2015). Effect of temperature and light on the growth of algae species: A review. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 50, pp. 431–444). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.05.024

Skifa, I., Chauchat, N., Cocquet, P.-H., & Guer, Y. Le. (2025a). Microalgae cultivation in raceway ponds: Advances, challenges, and hydrodynamic considerations. *EFB Bioeconomy Journal*, *5*, 100073. https://doi.org/10.1016/j.bioeco.2024.100073

Skifa, I., Chauchat, N., Cocquet, P.-H., & Guer, Y. Le. (2025b). Microalgae cultivation in raceway ponds: Advances, challenges, and hydrodynamic considerations. *EFB Bioeconomy Journal*, *5*, 100073. https://doi.org/10.1016/j.bioeco.2024.100073

Tiwari, G. N., Sharma, P. K., Goyal, R. K., & Sutar, R. F. (1998). EI IE| G'I' UILDII IG Estimation of an efficiency factor for a greenhouse: a numerical and experimental study. In *Energy and Buildings* (Vol. 28).

Uduman, N., Qi, Y., Danquah, M. K., Forde, G. M., & Hoadley, A. (2010). Dewatering of microalgal cultures: a major bottleneck to algae-based fuels. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, *2*(1).

Vadiveloo, A., Foster, L., Kwambai, C., Bahri, P. A., & Moheimani, N. R. (2021). Microalgae cultivation for the treatment of anaerobically digested municipal centrate (ADMC) and anaerobically digested abattoir effluent (ADAE). *Science of the Total Environment*, *775*. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145853

Vulsteke, E., Van Den Hende, S., Bourez, L., Capoen, H., Rousseau, D. P. L., & Albrecht, J. (2017). Economic feasibility of microalgal bacterial floc production for wastewater treatment and biomass valorization: A detailed up-to-date analysis of up-scaled pilot results. *Bioresource Technology*, *224*, 118–129. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.11.090

Wang, S. K., Stiles, A. R., Guo, C., & Liu, C. Z. (2014). Microalgae cultivation in photobioreactors: An overview of light characteristics. In *Engineering in Life Sciences* (Vol. 14, Number 6, pp. 550–559). Wiley-VCH Verlag. https://doi.org/10.1002/elsc.201300170

Williams, P. J. le B., & Laurens, L. M. L. (2010). Microalgae as biodiesel & biomass feedstocks: Review & analysis of the biochemistry, energetics & economics. *Energy & Environmental Science*, *3*(5), 554–590.

Xie, D., Ji, X., Zhou, Y., Dai, J., He, Y., Sun, H., Guo, Z., Yang, Y., Zheng, X., & Chen, B. (2022). Chlorella vulgaris cultivation in pilot-scale to treat real swine wastewater and mitigate carbon dioxide for sustainable biodiesel production by direct enzymatic transesterification. *Bioresource Technology*, *349*. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.126886

Xin, L., Hong-ying, H., Ke, G., & Ying-xue, S. (2010). Effects of different nitrogen and phosphorus concentrations on the growth, nutrient uptake, and lipid accumulation of a freshwater microalga Scenedesmus sp. *Bioresource Technology*, *101*(14), 5494–5500. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.02.016

Yaakob, M. A., Mohamed, R. M. S. R., Al-Gheethi, A., Ravishankar, G. A., & Ambati, R. R. (2021). Influence of nitrogen and phosphorus on microalgal growth, biomass, lipid, and fatty acid production: An overview. In *Cells* (Vol. 10, Number 2, pp. 1–19). MDPI. https://doi.org/10.3390/cells10020393

Zhan, J., Rong, J., & Wang, Q. (2017). Mixotrophic cultivation, a preferable microalgae cultivation mode for biomass/bioenergy production, and bioremediation, advances and prospect. *International Journal of Hydrogen Energy*, *42*(12), 8505–8517. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.12.021

Zhang, H., Wu, Y., Liu, D., Feng, S., Xuan, X., Dong, G., Cheng, J., Qin, Y., & Ngo, H. H. (2025). Insights into microalgal biotechnology: Current applications, key challenges, and future prospects. In *Journal of Environmental Management* (Vol. 394). Academic Press. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.127263

Zhang, Q., Wu, X., Xue, S., Liang, K., & Cong, W. (2013). Study of hydrodynamic characteristics in tubular photobioreactors. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, *36*(2), 143–150. https://doi.org/10.1007/s00449-012-0769-2

Zimmermann, A. W., Wunderlich, J., Müller, L., Buchner, G. A., Marxen, A., Michailos, S., Armstrong, K., Naims, H., McCord, S., Styring, P., Sick, V., & Schomäcker, R. (2020). Techno-Economic Assessment Guidelines for CO2 Utilization. In *Frontiers in Energy Research* (Vol. 8). Frontiers Media S.A. https://doi.org/10.3389/fenrg.2020.00005

Κούκος, Ι. Κ. (2019). *Εισαγωγή στον Σχεδιασμό Χημικών Εργοστασίων* (2nd ed.). Εκδόσεις Τζιόλα.