



## ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**«Τεχνική και Οικονομική Ανάλυση ενός  
Σύγχρονου Βιοδιυλιστηρίου 3<sup>ης</sup> Γενιάς για τη  
Μετατροπή CO<sub>2</sub> σε Βιομάζα Μικροφυκών και  
την Ανάκτηση Πολλαπλών Βιοπροϊόντων  
Υψηλής Προστιθέμενης Αξίας»**

**ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΥΜΟ: ΔΡΕΝΟΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ**

**ΑΕΜ: 74**

Επιβλέπων: Πενλόγλου Γιάννης

Επόπτες:

α) Φροντιστής Ζαχαρίας

β) Καραγιάννης Βάιος

ΚΟΖΑΝΗ, 06/10/2021



### **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Η παρούσα διπλωματική εργασία κατέστη δυνατή χάρις στο άψογο κλίμα συνεργασίας με τον επιβλέπων καθηγητή μου, κύριο Γιάννη Πενλόγλου. Τον ευχαριστώ θερμά για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε εξ' αρχής, αναθέτοντας μου το συγκεκριμένο θέμα, την επιστημονική του καθοδήγηση, τις υποδείξεις του, την επιμονή του, το αμείωτο ενδιαφέρον και την υποστήριξη του από την αρχή μέχρι το τέλος.

Τέλος, θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στην οικογένεια μου για όλη τη στήριξη, τη συμπαράσταση και την κατανόηση τους καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.



## Περιεχόμενα

| Κεφάλαιο  | Σελίδα    |
|---|-----------|
| Περιεχόμενα. . . . .  | 1         |
| Κατάλογος Σχημάτων.. . . .  | 2         |
| Κατάλογος Πινάκων. . . . .  | 3         |
| Περίληψη. . . . .   | 5         |
| Abstract. . . . .   | 6         |
| <b>1. Μικροφύκη και Τεχνολογίες Μικροφυκών..</b> . . . .              | <b>7</b>  |
| 1.1 Εισαγωγή. . . . .   | 7         |
| 1.2 Στελέχη Μικροφυκών. . . . .                                       | 9         |
| 1.3 Συστήματα Καλλιέργειας Μικροφυκών και Παραγωγής Βιομάζας. . . . . | 11        |
| 1.4 Διεργασίες Επεξεργασίας Βιομάζας. . . . .                         | 16        |
| 1.5 Παραγωγή Βιοπροϊόντων και Εφαρμογές Μικροφυκών. . . . .           | 18        |
| 1.6 Αντικείμενο, Στόχοι και Διάρθρωση της Εργασίας. . . . .           | 19        |
| <b>2. Μεθοδολογία Τεχνικό-Οικονομικής Ανάλυσης.</b> . . . .           | <b>21</b> |
| 2.1 Περιγραφή του Διαγράμματος Ροής. . . . .                          | 21        |
| 2.2 Στάδια της Ολοκληρωμένης Μονάδας. . . . .                         | 22        |
| 2.3 Σχεδιασμός των Επιμέρους Διεργασιών. . . . .                      | 25        |
| 2.4 Ισοζύγια Μάζας. . . . .   | 37        |
| 2.5 Ισοζύγια Ενέργειας. . . . .                                       | 41        |
| <b>3. Οικονομική Ανάλυση και Μελέτη Βιωσιμότητας.</b> . . . .         | <b>43</b> |
| 3.1 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση. . . . .                                 | 43        |
| 3.2 Ανάλυση Παγίου Κόστους. . . . .                                   | 44        |
| 3.3 Ανάλυση Λειτουργικού Κόστους. . . . .                             | 54        |
| 3.4 Υπολογισμός Οικονομικών Δεικτών. . . . .                          | 58        |
| 3.5 Υπολογισμός Περιβαλλοντικών Δεικτών. . . . .                      | 62        |
| <b>4. Ανάλυση Ευαισθησίας και Βελτιστοποίηση.</b> . . . .             | <b>65</b> |
| 4.1 Ανάλυση Αγοράς. . . . .   | 65        |
| 4.2 Προσδιορισμός Δυναμικότητας Μονάδας. . . . .                      | 67        |
| 4.3 Σημαντικότερες Παράμετροι. . . . .                                | 72        |
| 4.4 Προσδιορισμός Βέλτιστων Περιοχών Λειτουργίας. . . . .             | 78        |
| 4.5 Σενάρια Βελτιστοποίησης. . . . .                                  | 80        |
| <b>5. Συμπεράσματα και Προτάσεις.</b> . . . .                         | <b>83</b> |
| Βιβλιογραφία. . . . .   | 87        |
| Παράρτημα. . . . .  | 93        |

## Κατάλογος Σχημάτων

| Σχήμα   | Σελίδα |
|---|--------|
| 1.1 Μικροφύκη κοντά στην επιφάνεια της θάλασσας.  | 7      |
| 1.2 Μελέτη στελεχών μικροφυκών μέσω μικροσκοπίου.   | 8      |
| 1.3 Ταξινόμηση των σημαντικότερων στελεχών μικροφυκών.  | 10     |
| 1.4 <i>Spirulina</i> σε φυσικό σχήμα.   | 11     |
| 1.5 Ανοιχτά συστήματα καλλιέργειας μικροφυκών.  | 12     |
| 1.6 Ανοιχτού τύπου καλλιέργειες μικροφυκών.   | 14     |
| 1.7 Διαφορετικοί τύποι φωτό-βιοαντιδραστήρων επίπεδης πλάκας.   | 15     |
| 1.8 Διαφορετικοί τύποι αυλωτών φωτό-βιοαντιδραστήρων.   | 15     |
| 1.9 Διαφορετικοί τύποι φωτό-βιοαντιδραστήρων κατακόρυφης στήλης.  | 16     |
| 1.10 Η γενική ιδέα ενός βιοδιυλιστηρίου 3 <sup>ης</sup> γενιάς.   | 19     |
| 2.1 Διάγραμμα ροής της ολοκληρωμένης μονάδας καλλιέργειας μικροφυκών και παραγωγής πολλαπλών βιοχημικών προϊόντων.      | 23     |
| 2.2 Αρχή λειτουργίας της στήλης προσρόφησης.  | 27     |
| 2.3 Σχεδιάγραμμα εναλλάκτη θερμότητας τύπου διπλού σωλήνα.  | 27     |
| 2.4 Διάταξη σωληνοειδούς/αυλωτού φωτό-βιοαντιδραστήρα.  | 29     |
| 2.5 Τυπική διάταξη μίας δεξαμενής καθίζησης.  | 30     |
| 2.6 Αρχή λειτουργίας της στήλης διήθησης.   | 31     |
| 2.7 Αντιδραστήρας συνεχούς λειτουργίας και πλήρους ανάμιξης.  | 31     |
| 2.8 Αρχή λειτουργίας του φυγοκεντρικού διαχωριστή.  | 32     |
| 2.9 Αρχή λειτουργίας συσκευής διήθησης μεμβρανών.   | 33     |
| 2.10 Ομογενοποιητής για τη διάρρηση των κυττάρων και των μεμβρανών τους.  | 34     |
| 2.11 Σύστημα υπερδιήθησης κεραμικών μεμβρανών.  | 35     |
| 2.12 Απεικόνιση της διάταξης του δοχείου εκχύλισης.   | 36     |
| 2.13 Διάταξη βιομηχανικών αποστακτικών στηλών.  | 37     |
| 2.14 Αντίδραση παραγωγής γλυκόζης από την υδρόλυση υδατανθράκων.  | 40     |
| 3.1 Διάγραμμα κόστους προμήθειας της στήλης προσρόφησης.  | 45     |
| 3.2 Διάγραμμα κόστους αγοράς της στήλης διήθησης.   | 47     |
| 3.3 Διάγραμμα κόστους προμήθειας φυγοκεντρική.  | 48     |
| 3.4 Διάγραμμα κόστους αγοράς δοχείου εκχύλισης.   | 50     |
| 4.1 Επίδραση της δυναμικότητας της μονάδας στο πάγιο και λειτουργικό κόστος.  | 68     |
| 4.2 Επίδραση της δυναμικότητας στο κόστος παραγωγής της βιομάζας και των συνολικών βιοχημικών προϊόντων.                | 69     |
| 4.3 Επίδραση της δυναμικότητας της μονάδας στο καθαρό κέρδος.   | 70     |
| 4.4 Επίδραση της δυναμικότητας της μονάδας στον χρόνο εξόφλησης κεφαλαίου.  | 70     |
| 4.5 Επίδραση της δυναμικότητας της μονάδας στην απόδοση επένδυσης.  | 71     |
| 4.6 Επίδραση της δυναμικότητας της μονάδας στο κέρδος εγχειρήματος.   | 72     |
| 4.7 Ανάλυση ευαισθησίας της επίδραση των σημαντικότερων παραμέτρων στο κέρδος εγχειρήματος για δυναμικότητα 800 tn/yr.  | 74     |
| 4.8 Ανάλυση ευαισθησίας της επίδραση των σημαντικότερων παραμέτρων στο κέρδος εγχειρήματος για δυναμικότητα 1000 tn/yr. | 75     |
| 4.9 Ανάλυση ευαισθησίας της επίδραση των σημαντικότερων παραμέτρων στο κέρδος εγχειρήματος για δυναμικότητα 1200 tn/yr. | 76     |
| Π.1 Δείκτης κόστους εγκαταστάσεων χημικής μηχανικής.  | 93     |
| Π.2 Δείκτης κόστους απασχόλησης.  | 94     |
| Π.3 Δείκτης τιμών παραγωγής.  | 95     |

## Κατάλογος Πινάκων

| Πίνακας  | Σελίδα |
|--|--------|
| 2.1 Κατάταξη των επιμέρους διεργασιών του διαγράμματος ροής του Σχήματος 2.1 σε χημικές και φυσικές διεργασίες.                              | 26     |
| 2.2 Σύσταση απαερίων καύσης της μονάδας της Δ.Ε.Η.   | 37     |
| 2.3 Μοριακοί τύποι των συστατικών της βιομάζας μικροφυκών.   | 38     |
| 2.4 Σύσταση βιομάζας μικροφυκών του στελέχους <i>Arthrospira</i> .   | 39     |
| 2.5 Τιμές παραμέτρων και αποδόσεων των σημαντικότερων διεργασιών.  | 41     |
| 3.1 Κόστος αγοράς εναλλακτών θερμότητας για κοινό εξοπλισμό εγκαταστάσεων.   | 46     |
| 3.2 Αγορά δεξαμενών για κοινό εξοπλισμό εγκαταστάσεων.   | 46     |
| 3.3 Αγορά χημικών αντιδραστήρων για κοινό εξοπλισμό εγκαταστάσεων.   | 48     |
| 3.4 Κόστος προμήθειας μεμβρανών διήθησης.  | 49     |
| 3.5 Επιμέρους πάγιο κόστος προμήθειας των συσκευών και συνολικό.   | 52     |
| 3.6 Ανάλυση κόστους παγίου κεφαλαίου (FCI).  | 54     |
| 3.7 Κόστος πρώτων υλών.  | 55     |
| 3.8 Κόστος βοηθητικών παροχών.   | 56     |
| 3.9 Κόστος επεξεργασίας αποβλήτων.   | 57     |
| 3.10 Κόστος άμεσης εργασίας.   | 57     |
| 3.11 Έσοδα λόγω διάθεσης των προϊόντων στην αγορά.   | 59     |
| 3.12 Καταναλισκόμενη ηλεκτρική και θερμική ενέργεια.   | 62     |
| 3.13 Εισερχόμενο νερό και CO <sub>2</sub> που απομακρύνεται.   | 63     |
| 3.14 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα οικονομικής και περιβαλλοντικής ανάλυσης του Σεναρίου I (δυναμικότητα 1.000 tn/yr).                          | 64     |
| 4.1 Επιλεγμένες παράμετροι για την ανάλυση ευαισθησίας.  | 73     |
| 4.2 Ποσοστά μεταβολής του κέρδους εγχειρήματος κατά τη μεταβολή των σημαντικότερων παραμέτρων της ολοκληρωμένης διεργασίας από το Σενάριο I. | 78     |
| 4.3 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα οικονομικής και περιβαλλοντικής ανάλυσης του Σεναρίου II και σύγκριση με το Σενάριο I.                        | 79     |
| 4.4 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα οικονομικής και περιβαλλοντικής ανάλυσης του Σεναρίου III και σύγκριση με το Σενάριο I.                       | 80     |
| 4.5 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα οικονομικής και περιβαλλοντικής ανάλυσης του Σεναρίου IV και σύγκριση με το Σενάριο I.                        | 81     |
| 4.6 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα οικονομικής και περιβαλλοντικής ανάλυσης του Σεναρίου V και σύγκριση με το Σενάριο I.                         | 82     |





## Περίληψη

Στην παρούσα εργασία διερευνάται ο σχεδιασμός και η οικονομική και περιβαλλοντική αξιολόγηση ενός σύγχρονου βιοδιυλιστηρίου 3<sup>ης</sup> γενιάς για την παραγωγή βιομάζας μικροφυκών και την ταυτόχρονη σύνθεση και ανάκτηση πολλαπλών βιοχημικών προϊόντων υψηλής προστιθέμενης αξίας (σακχάρων, πρωτεϊνών, λιπιδίων και φυκοκυανίνης), μέσω βιομετατροπής του CO<sub>2</sub>. Το ισχυρό πλεονέκτημα της τεχνολογίας είναι ότι τροφοδοτείται άμεσα από τα απαέρια μίας μονάδας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Η ολοκληρωμένη μονάδα παραγωγής κατανέμεται στα εξής στάδια: προεπεξεργασία αέριων ρύπων, καλλιέργεια μικροφυκών και παραγωγή βιομάζας, αφυδάτωση βιομάζας, παραγωγή και διαχωρισμός σακχάρων, και ανάκτηση και καθαρισμός πρωτεϊνών, λιπιδίων και φυκοκυανίνης. Το CO<sub>2</sub> που περιέχεται στα καυσαέρια αποτελεί τη μοναδική πηγή άνθρακα για τα μικροφύκη, ενώ το επιλεγμένο στέλεχος αυτών είναι το ευρέως διαδεδομένο είδος *Arthrospira sp. (Spirulina)*. Ο προσδιορισμός του εύρους λειτουργίας της δυναμικότητας της μονάδας –γύρω από τους 1.000 tn/yr– στηρίχτηκε στη μελέτη συγκεκριμένων οικονομικών δεικτών και της αγοράς των προϊόντων μικροφυκών, με σκοπό τη μεγιστοποίηση του κέρδους εγχειρήματος και την ελαχιστοποίηση του σχετικού ρίσκου. Η ανάλυση ευαισθησίας για τη μελέτη των σημαντικότερων παραμέτρων φανέρωσε πως αυτές που επιδρούν περισσότερο στον οικονομικό και περιβαλλοντικό αντίκτυπο της μονάδας είναι η συγκέντρωση της βιομάζας, η περιεκτικότητα της βιομάζας σε φυκοκυανίνη, η απόδοση της εκχύλισης της φυκοκυανίνης, η δυναμικότητα της μονάδας και ο μέγιστος ειδικός ρυθμός ανάπτυξης των μικροφυκών. Με βάση τη συγκεκριμένη ανάλυση εντοπίστηκαν ο φωτό-βιοαντιδραστήρας και η εκχύλιση φυκοκυανίνης ως οι δύο διεργασίες-στόχοι για βελτιστοποίηση της μονάδας προς υψηλότερο κέρδος και μεγαλύτερη δέσμευση και μετατροπή CO<sub>2</sub>. Σε κάθε περίπτωση, η περιεκτικότητα φυκοκυανίνης ήταν η σημαντικότερη παράμετρος, καθώς η συγκεκριμένη χρωστική παράγεται σε μικρή ποσότητα, αλλά έχει ιδιαίτερα υψηλή εμπορική αξία. Για την περαιτέρω βελτίωση της μονάδας διερευνήθηκαν πρόσθετα σενάρια λειτουργίας που αφορούν τη χρήση αποκλειστικά θαλασσινού νερού και την ενεργειακή ολοκλήρωση της μονάδας. Παρόλο που το βιοδιυλιστήριο είναι κοστοβόρο, τόσο όσο προς το πάγιο, όσο και προς το λειτουργικό του κόστος, μπορεί να ειπωθεί πως εμφανίζει ισχυρά θετική προοπτική, λόγω της υψηλής αξίας των βιοπροϊόντων που παράγονται. Σημαντικές προϋποθέσεις για μία μελλοντική επένδυση σε μία τέτοια τεχνολογία είναι η πλήρης βελτιστοποίηση των σταδίων της μονάδας, η ελαχιστοποίηση της χρήσης φρέσκου νερού, η ενεργειακή ολοκλήρωση της μονάδας, η αξιοποίηση όλων των διαθέσιμων συστατικών της βιομάζας μικροφυκών, αλλά και η δέσμευση σημαντικών ποσοτήτων CO<sub>2</sub>. Συνεπώς, είναι επιβεβλημένο να σχεδιαστούν και να αναπτυχθούν οικονομικά και περιβαλλοντικά ανταγωνιστικές αλυσίδες αξίας πολλαπλών βιοπροϊόντων μικροφυκών, υπό τους αυστηρούς όρους που θέτει ένα βιοδιυλιστήριο 3<sup>ης</sup> γενιάς.

**Λέξεις Κλειδιά:** Βιοδιυλιστήριο, Μικροφύκη, Τεχνικό-οικονομική Ανάλυση, Φυκοκυανίνη, Φωτό-βιοαντιδραστήρας.

---

## Abstract

---

The present dissertation investigates the design and economic and environmental evaluation of a contemporary 3<sup>rd</sup> generation biorefinery for the production of microalgal biomass and the concomitant generation and recovery of multiple biochemical products of high-added value (sugars, proteins, lipids and phycocyanin), via the bioconversion of CO<sub>2</sub>. The major advantage of this technology is that the feedstock is directly linked with the gaseous exhaust emissions of a power plant. The integrated production plant consists of the following process-steps: pretreatment of gaseous feedstock, microalgae cultivation and biomass production, biomass dehydration, production and separation of sugars, and recovery and purification of proteins, lipids and phycocyanin. The CO<sub>2</sub> that is contained in the exhaust gases of the power plant is the only carbon source for the microalgae, while the selected microalgal strain is the well-known and well-studied species *Arthrospira sp. (Spirulina)*. The determination of the plant (biomass) capacity range –around 1,000 tn/yr– was based on the study of specific economic indicators and of the microalgal products market, in order to maximize the venture profit and minimize the associated risk. A detailed sensitivity analysis was performed to evaluate the effect of the most significant parameters; it was found that biomass concentration, phycocyanin content in biomass, phycocyanin extraction yield, biomass capacity and maximum specific growth rate of microalgae, were the parameters that presented major impact to the economic and environmental performance of the plant. Moreover, the photo-bioreactor and the extraction of phycocyanin are the two targeted process-steps that should be optimized towards larger profit and maximum CO<sub>2</sub> sequestration and conversion. In any case, the phycocyanin content was the most significant parameter, since this pigment is of high market value, despite that is produced in small amounts. In order to further optimize the integrated process, additional operational scenarios were investigated: exclusive utilization of seawater in the plant and thermal and electrical energy integration of the various process-steps. Despite that the biorefinery is characterized by large capital and operational expenditures, it can be concluded that it presents a positive potential, due to the large commercial value of the generated bioproducts. The most important prerequisites for a future investment in a relevant technology are the optimization of the several process-steps, the minimization of freshwater use, the energy integration within the plant, the utilization of all available components of microalgal biomass, as well as, the sequestration of significant volumes of CO<sub>2</sub>. As a result, it is mandatory to design and develop economically and environmentally competitive value chains based on multiple microalgal bioproducts, under the rigorous specifications as defined by a 3<sup>rd</sup> generation biorefinery.

**Keywords:** Biorefinery, Microalgae, Techno-economic Analysis, Phycocyanin, Photo-bioreactor.

## Κεφάλαιο 1:

# Μικροφύκη και Τεχνολογίες Μικροφυκών

---

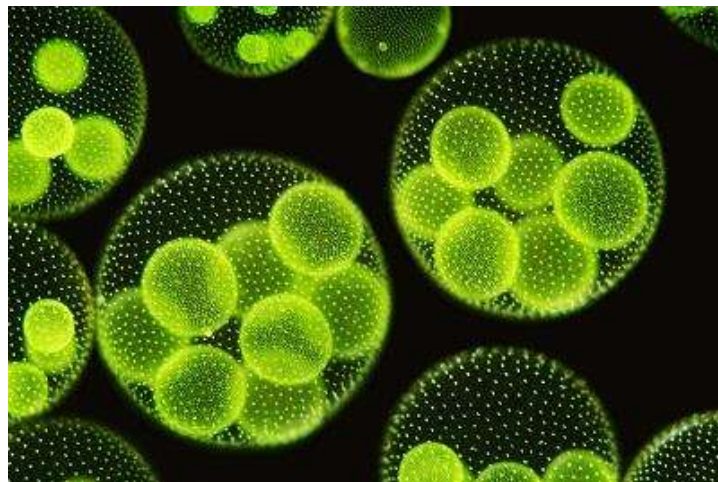
### 1.1. Εισαγωγή

Γενικά, τα μικροφύκη ή μικροάλγη (microalgae) είναι φωτοσυνθετικοί μικροοργανισμοί, οι οποίοι απαντώνται τόσο σε γλυκά, όσο και σε αλμυρά (θαλασσινά) νερά. Ειδικότερα, τα μικροφύκη μπορούν να βρεθούν οπουδήποτε συμπίπτει το ηλιακό φως με το νερό, π.χ., στα χερσαία εδάφη, στους πάγους, αλλά κυρίως στις λίμνες, στα ποτάμια, στις ζεστές πηγές και στους ωκεανούς (Σχήμα 1.1) (Darvehei et al., 2018). Ο μηχανισμός τον οποίο αξιοποιούν τα μικροφύκη για να πραγματοποιήσουν τη φωτοσύνθεση είναι παρόμοιος με αυτόν που χρησιμοποιείται από τους φυτικούς οργανισμούς του εδάφους και τα ανώτερα φυτά (Singh and Patidar, 2018). Το χαρακτηριστικό αυτό οφείλεται στην πολύ απλή κυτταρική δομή και γενικότερα φυσιολογία τους, συνεπώς, η χρήση του νερού, του CO<sub>2</sub> και των θρεπτικών συστατικών από τα μικροφύκη παρουσιάζει αυξημένη απόδοση. Ακριβώς ανάλογη αποτελεσματικότητα παρουσιάζουν τα μικροφύκη και στη μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε βιομάζα και ενδοκυτταρικά συστατικά (Prinsen et al., 2017). Επιπλέον, η απουσία μη φωτοσυνθετικών υποστηρικτικών δομών (όπως π.χ., ρίζες, φλοιοί, κοτσάνια, κλπ.) αποτελεί άλλο ένα πλεονέκτημα των μικροφυκών, κυρίως κατά την προσπάθεια αξιοποίησης της βιομάζας και των πολύτιμων συστατικών της (Κόλλιας, 2013). Τα μικροφύκη, ως μικροοργανισμοί είτε σε μονοκύτταρη ή σε πολυκύτταρη μορφή, κατατάσσονται σε ευκαρυωτικά και προκαρυωτικά στελέχη. Ενώ τα ευκαρυωτικά μικροφύκη περιλαμβάνουν τόσο τα διάτομα όσο και τα πράσινα φύκη, στα προκαρυωτικά μικροφύκη ανήκουν κυρίως τα κυανοβακτήρια (Χώτος, 2018).



**Σχήμα 1.1.** Μικροφύκη κοντά στην επιφάνεια της θάλασσας.

Σύγχρονες έρευνες έχουν αποδείξει ότι τα συστήματα καλλιέργειας μικροφυκών μπορούν να απορροφήσουν έως και 200 φορές περισσότερο διοξείδιο του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) από ότι τα δέντρα και οι υπόλοιποι φυτικοί οργανισμοί. Ωστόσο, για να επιτευχθεί αυτή η απόδοση απαιτούνται στις καλλιέργειες ειδικά επίπεδα αναλογίας CO<sub>2</sub> σε αέρα, παράμετρος που διαφοροποιείται ανάλογα με το είδος των μικροφυκών. Αναφέρεται πως σε μία καλλιέργεια μικροφυκών η κατάλληλη περιεκτικότητα CO<sub>2</sub> κυμαίνεται από 0,038% έως 10% v/v (Herador, 2016). Συνεπώς, καθώς τα χαρακτηριστικά των συστημάτων καλλιεργειών μεταβάλλονται για κάθε διαφορετικό στέλεχος μικροφυκών, πρόσφατα έχει εκκινήσει μία σημαντική μελέτη σε διαφορετικές περιοχές του κόσμου για τον εντοπισμό των περισσότερο υποσχόμενων στελεχών. Σε αυτό το πλαίσιο, ένας από τους απλούστερους και ευρέως χρησιμοποιούμενους τρόπους μελέτης των κυττάρων των μικροφυκών -η μικροσκοπία- παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.2 (Ψαχουλιά, 2018). Από την άλλη πλευρά, παρά τον μεγάλο αριθμό των στελεχών μικροφυκών και των αντίστοιχων φυλογενετικών οικογενειών τους, οι περισσότερες ερευνητικές εργασίες έχουν επικεντρωθεί σε ένα μικρό αριθμό ταχέως αναπτυσσόμενων ειδών που ταυτόχρονα έχουν τη δυνατότητα να συσσωρεύουν σημαντικές ποσότητες χρήσιμων βιοχημικών συστατικών, όπως πρωτεΐνες, υδατάνθρακες, λιπίδια, χρωστικές ενώσεις, κ.ά. Ενδεικτικά, τα στελέχη *Chlamydomonas*, *Chlorella* και *Arthrospira* θεωρούνται από τα πιο ελπιδοφόρα στελέχη για εμπορικούς βιοτεχνολογικούς σκοπούς (Gorhich et al., 2020).



**Σχήμα 1.2.** Μελέτη στελεχών μικροφυκών μέσω μικροσκοπίου.

Επιγραμματικά, τα μικροφύκη παρουσιάζουν συγκεκριμένα ισχυρά πλεονεκτήματα (Benneman et al., 1987):

- (i) Είναι ταχέως αναπτυσσόμενοι μικροοργανισμοί που διπλασιάζονται σε χρονικό διάστημα μικρότερο από μία ημέρα.
- (ii) Είναι ικανά να επιτύχουν υψηλούς ρυθμούς παραγωγής βιομάζας και βιοχημικών προϊόντων, συγκεκριμένα άνω των 100 τόνων ανά εκτάριο (επί ξηρού βάρους).

(iii) Χρησιμοποιούν κυρίως το άμεσα διαθέσιμο ηλιακό φως ως πηγή ενέργειας, με βαθμό απόδοσης της μετατροπής έως και 10%.

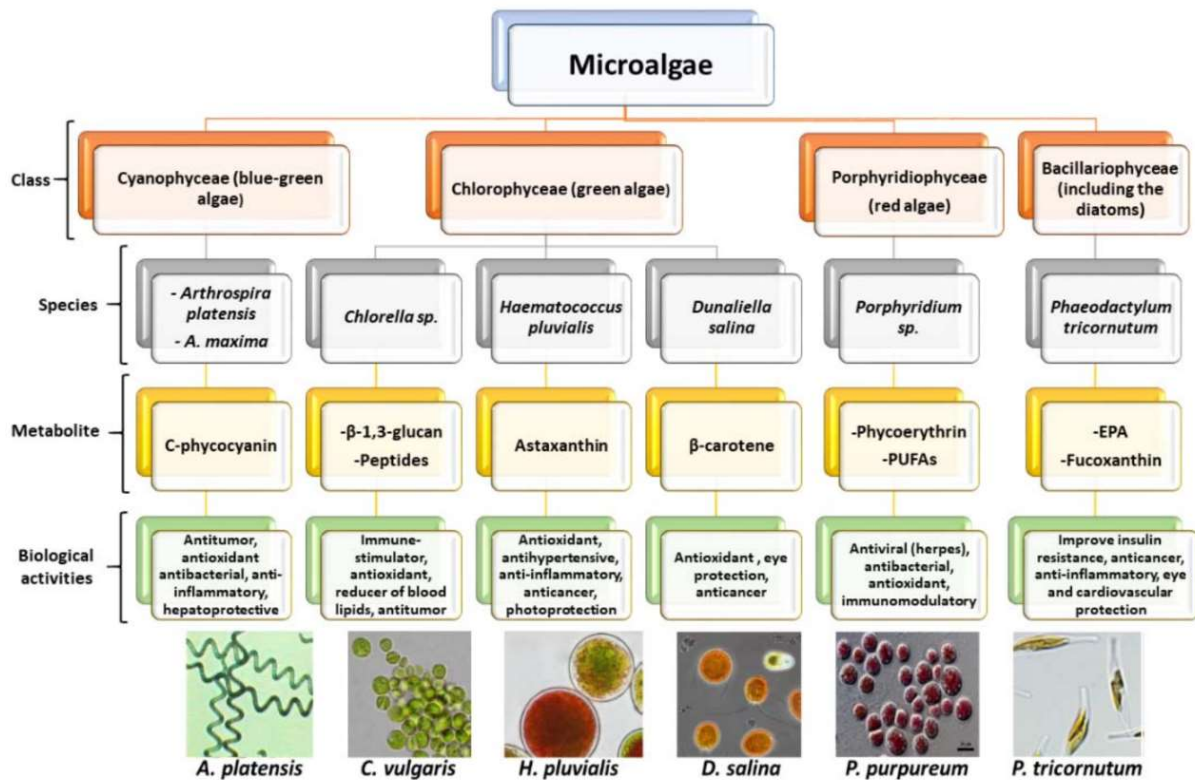
## 1.2. Στελέχη Μικροφυκών

Γενικά, τα φύκη είναι μία ευρεία πολυφυλετική κατηγορία μόνο- ή πολύ-κύτταρων οργανισμών, με μεγάλη ποικιλία σε σχήματα και μεγέθη. Ο όρος «φύκη» περιλαμβάνει δύο μεγάλες κύριες μορφολογικές κατηγορίες (Ψαχουλιά, 2018):

- (i) Τα μακροφύκη (macroalgae ή κοινώς seaweeds), συνήθως θαλάσσια είδη.
- (ii) Τα μικροφύκη (microalgae), τα οποία συναντώνται στα περισσότερα υδάτινα περιβάλλοντα.

Το βασικό κριτήριο διάκρισης των δύο αυτών ειδών είναι το μέγεθος τους. Πιο συγκεκριμένα, τα μακροφύκη έχουν κατά κανόνα μήκος μερικών εκατοστών, το οποίο όμως σε ιδιαίτερες περιπτώσεις μπορεί να φτάσει και τα πολλά μέτρα (50-70 m), π.χ., στα γιγάντια φαιοφύκη (καφέ φύκη). Αντίθετα, τα μικροφύκη έχουν μήκος από λίγα μικρόμετρα (πρακτικά από 0,2-50 μm για τα συνηθέστερα μονοκύτταρα στελέχη, έως και 100-200 μm στην περίπτωση των πολυκύτταρων στελεχών με νηματοειδή μορφή), μέχρι και κάποιες εκατοντάδες μικρόμετρα (100-2.000 μm για συγκεκριμένα διάτομα στελέχη) (Barsanti and Gualtieri, 2006). Τα παρόντα σε όλα τα οικοσυστήματα -όχι μόνο τα υδρόβια- μικροφύκη, μαζί με τα μακροφύκη που ευδοκούν στην παραλιακή ζώνη, το φυτοπλαγκτό και τα μικροφύκη του πυθμένα, ορίζουν τους κύριους πρωτογενείς παραγωγούς στη θάλασσα και στα εσωτερικά ύδατα (Falkowski, 1980, Reynolds, 2006), καθώς και σε ακραία περιβάλλοντα (π.χ., θερμοπηγές και παγετώνες) (Brock, 1967, Bunt and Wood, 1963). Είναι αξιοσημείωτο πως σε αυτούς τους οργανισμούς οφείλεται κατά προσέγγιση το 50% της φωτοσυνθετικής παραγωγής O<sub>2</sub> στη Γη (Wiessner et al., 1995).

Στη διεθνή βιβλιογραφία υπάρχουν εκτιμήσεις που κάνουν λόγο για περισσότερα από 50.000 είδη μικροφυκών, από τα οποία περίπου τα 30.000 έχουν ήδη μελετηθεί με λεπτομέρεια (Richmond, 2003). Όπως μπορεί να φανεί στο Σχήμα 1.3, η ταξινόμηση τους είναι μία γενικά πολύπλοκη διαδικασία, λόγω της σημαντικής διαφοροποίησης και ποικιλομορφίας τους. Ακολουθώντας μία απλή προσέγγιση ταξινόμησης μπορεί να ειπωθεί πως τα μικροφύκη διαχωρίζονται σε κυανοβακτήρια (με μπλε-πράσινο χρώμα), ροδόφυτα (κόκκινα φύκη), χλωρόφυτα (πράσινα φύκη) και χρωμόφυτα (όλα τα υπόλοιπα φύκη). Ίσως η πιο ευρέως μελετημένη τάξη μικροφυκών είναι τα χλωρόφυτα, με χαρακτηριστικότερους αντιπροσώπους τα στελέχη *Dunaliella*, *Botryococcus*, *Chlamydomonas* και *Chlorella*, τα οποία παρουσιάζουν διαφορετικά σχήματα (Heimann and Huerlimann, 2015). Έτσι, τα στελέχη *Chlorella* και *Dunaliella* είναι σφαιρικά, σχήμα όμως που μεταβάλλεται κατά την ανάπτυξη των κυττάρων τους. Αντίθετα, τα στελέχη *Chlamydomonas* and *Botryococcus* έχουν κατά κανόνα ωσειδές και σε ιδιαίτερες περιπτώσεις πυραμιδικό σχήμα. Από την άλλη πλευρά, το στέλεχος *Arthrospira* (*Spirulina*, Σπιρουλίνα) -το οποίο αποτελεί το επιλεγμένο στέλεχος για την παρούσα εργασία- είναι κυανοβακτήριο με κυλινδρικό σχήμα.



Σχήμα 1.3. Ταξινόμηση των σημαντικότερων στελεχών μικροφυκών.

Όσον αφορά τα βιοχημικά συστατικά που μπορούν τα μικροφύκη να συσσωρεύσουν στο εσωτερικό τους, το στέλεχος *Botryococcus* παρουσιάζει τη μεγαλύτερη ποσότητα ενδοκυτταρικών λιπιδίων (έως 75% w/w). Αντίθετα, το στέλεχος *Arthrospira* εμφανίζει σημαντικά χαμηλότερη περιεκτικότητα λιπιδίων (7-23% w/w). Τα μικροφύκη που ανήκουν στην οικογένεια της *Chlorella* μπορούν να παράγουν λιπίδια από 14% έως και 56% w/w. Επιπλέον, το στέλεχος *Dunaliella* εμφανίζει σημαντική περιεκτικότητα σε πρωτεΐνες (έως 80% w/w), ενώ το στέλεχος *Chlamydomonas* περιορίζεται σε περιεκτικότητα πρωτεϊνών μέχρι 50% w/w. Το είδος *Arthrospira* ανήκει επίσης στους σημαντικούς παραγωγούς πρωτεϊνών (57-65% w/w), σε αντίθεση με το είδος *Botryococcus* που δεν διακρίνεται για την ποσοστιαία συσσώρευση τους (3-10% w/w). Τέλος, αναφορικά με την παραγωγή υδατανθράκων, όλα γενικά τα χλωρόφυτα εμφανίζουν συγκρίσιμα ποσοστά, τα οποία κυμαίνονται από 10% έως 25% w/w, με εξαίρεση την *Arthrospira* που παρουσιάζει υψηλότερη περιεκτικότητα (20-30% w/w) (Kharbach and Essamri, 2019).

Το είδος μικροφυκών *Arthrospira*, το οποίο όπως αναφέρθηκε και παραπάνω αποτελεί το αντικείμενο μελέτης της εργασίας, είναι και εμπορικά γνωστό ως Σπιρουλίνα (*Spirulina*). Η *Arthrospira* είναι ένα νηματοειδές φωτοσυνθετικό κυανοβακτήριο (Σχήμα 1.4), αναγνωρισμένο από τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας (Π.Ο.Υ.) ως μία από τις πιο σημαντικές υπερτροφές (superfoods) (Mobin et al., 2018). Αυτό οφείλεται κυρίως στην πολύ υψηλή περιεκτικότητά της σε πρωτεΐνες και αμινοξέα, που λειτουργούν ως απαραίτητα συμπληρωματικά συστατικά για την ανθρώπινη διατροφή. Περιέχει επίσης

υψηλές συγκεντρώσεις βιταμινών, μετάλλων, ιχνοστοιχείων, βιοδραστικών ενώσεων όπως αντιοξειδωτικά, και χρωστικές ουσίες (καροτενοειδή) όπως η φυκοκυανίνη και η καροτίνη (Khanra et al., 2018). Στα πλεονεκτήματα του συγκεκριμένου στελέχους ανήκει η ευκολία που δείχνουν τα κύτταρα του στην ανάπτυξη τους και η προσαρμογή τους ακόμη και σε ακραία περιβάλλοντα (π.χ., αλκαλικά μέσα, αλατούχα περιβάλλοντα, υψηλές θερμοκρασίες και υψηλές εντάσεις φωτός). Επίσης, είναι κατά κανόνα λιγότερο ευαίσθητα σε πηγές μόλυνσης από άλλα είδη μικροφυκών και μικροοργανισμών, γεγονός που τα καθιστά ως την πιο ευνοϊκή επιλογή για καλλιέργεια μεγάλης κλίμακα (Morais et al., 2020). Είναι αξιοσημείωτο πως κατά προσέγγιση το 60% της παγκόσμια παραγόμενης βιομάζας μικροφυκών αποδίδεται στη Σπιρουλίνα (Mitra and Mishra, 2017). Εκτός από την εφαρμογή του ως διατροφικό συστατικό, το στέλεχος *Arthrospira* μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή βιοκαυσίμων (βιοντίζελ, βιοαιθανόλη, βιοβουτανόλη, κλπ.) από τα λιπίδια και τους υδατάνθρακες που περιέχει (Ljubic et al., 2018, Mata et al., 2016). Από τα διαφορετικά είδη *Arthrospira* που έχουν γίνει γνωστά μέχρι σήμερα, τα πιο σημαντικά ως προς τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά τους είναι τα *A. maxima* και *A. platensis* (Soni et al., 2017).



Σχήμα 1.4. *Spirulina* σε φυσικό σχήμα (Henrikson, 2009).

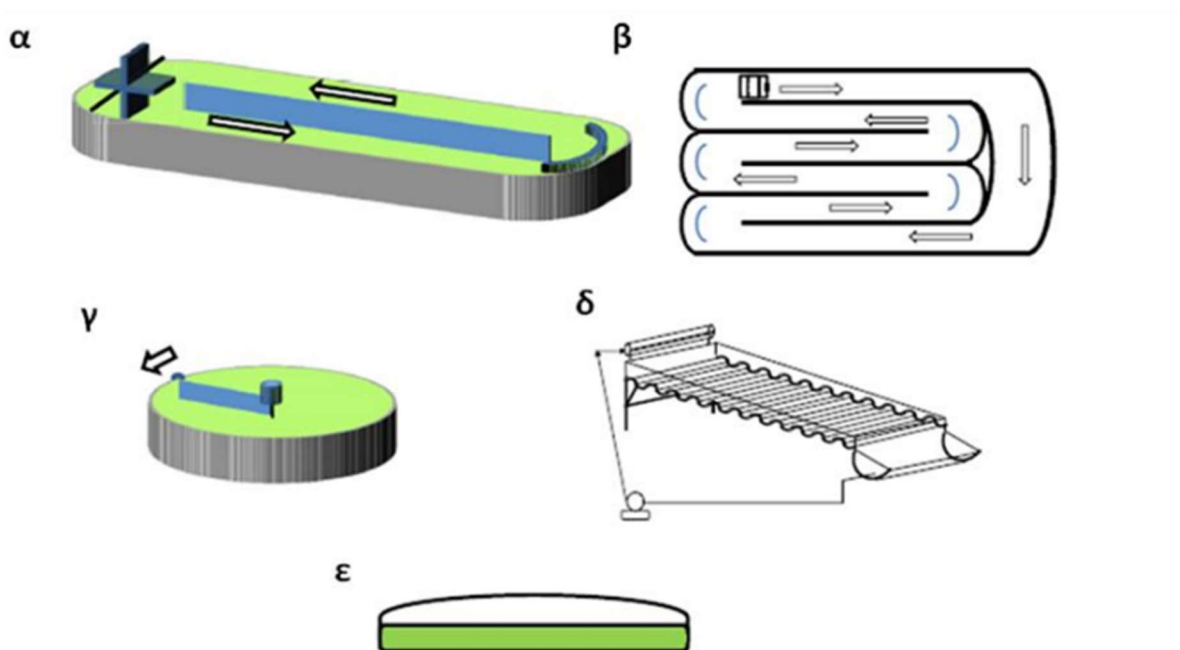
### 1.3. Συστήματα Καλλιέργειας Μικροφυκών και Παραγωγής Βιομάζας

Οι καλλιέργειες των μικροφυκών πραγματοποιούνται ήδη παγκόσμια σε μεγάλη κλίμακα. Τα συστήματα καλλιέργειας διαχωρίζονται ανάλογα με το αν αλληλεπιδρούν ή όχι με το περιβάλλον σε (α) ανοικτά συστήματα και (β) κλειστά συστήματα (Παύλου et al., 2019). Στα ανοικτού τύπου συστήματα καλλιέργειών τα μικροφύκη αναπτύσσονται σε τεχνητούς ή φυσικούς περιέκτες (π.χ., δεξαμενές, νερόλακκοι, λίμνες, κλπ.). Αντίθετα, στα κλειστού τύπου συστήματα η καλλιέργεια των κυττάρων λαμβάνει χώρα εντός διαφόρων διατάξεων και σχημάτων κλειστών περιεκτών, οι οποίοι ονομάζονται φωτό-βιοαντιδραστήρες (photobioreactors, PBRs). Οι φωτό-βιοαντιδραστήρες έχουν το πλεονέκτημα ότι αποτρέπουν την άμεση επαφή των μικροφυκών με το εξωτερικό περιβάλλον και τις

σχετικές συνθήκες, συνεπώς τα προστατεύουν από διάφορους κινδύνους, π.χ., επιμολύνσεις από ξενιστές και ανταγωνιστικούς μικροοργανισμούς, ενώ ταυτόχρονα παρέχουν τη δυνατότητα πλήρως ελεγχόμενων συνθηκών καλλιέργειας (Huang et al., 2019). Από την άλλη πλευρά όμως, το κόστος καλλιέργειας -τόσο το πάγιο, όσο και το λειτουργικό κόστος- στα κλειστού τύπου συστήματα είναι ιδιαίτερος υψηλότερο από το αντίστοιχο κόστος των συστημάτων ανοικτού τύπου (Παύλου et al., 2019).

### **Ανοικτού Τύπου Καλλιέργειες Μικροφυκών (Open Ponds)**

Όπως αναφέρθηκε ήδη, οι ανοικτού τύπου δεξαμενές καλλιέργειας μικροφυκών έχουν το πλεονέκτημα του μικρότερου κόστους εγκατάστασης και λειτουργίας από ότι οι φωτό-βιοαντιδραστήρες, ενώ παρέχουν και τη δυνατότητα καλλιέργειας μικροφυκών με υψηλή δυναμικότητα (Μάρκου et al., 2013). Στην περίπτωση που αξιοποιούνται τα ανοιχτά συστήματα, στόχος είναι η υπαίθρια παραγωγή βιομάζας υπό το μικρότερο δυνατό κόστος. Λόγω της ανοιχτής διαμόρφωσής τους, αξιοποιούνται περισσότερο στα ανθεκτικότερα στελέχη, όπως είναι τα *Spirulina*, *Dunaliella* και *Chlorella*. Κατά το παρόν, η μεγάλη πλειοψηφία των μονάδων παραγωγής προϊόντων μικροφυκών σε μεγάλη κλίμακα ανήκει σε αυτού του τύπου ανοιχτά συστήματα, τα οποία εκμεταλλεύονται αποκλειστικά το ηλιακό φως της ημέρας (Oncel, 2015). Η κατάταξη των ανοικτών συστημάτων καλλιέργειας παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.5.



**Σχήμα 1.5.** Ανοιχτά συστήματα καλλιέργειας μικροφυκών: (α) Δεξαμενή τύπου raceway, (β) Λιμνοδεξαμενή πολλών πλεγμάτων, (γ) Κυκλική δεξαμενή, (δ) Κεκλιμένο σύστημα, και (ε) Κεκαλυμμένη δεξαμενή.



Στα μειονεκτήματα των ανοικτού τύπου καλλιεργειών ανήκει το γεγονός ότι τα μικροφύκη είναι εκτεθειμένα σε περιβαλλοντικούς παράγοντες και μπορεί να επιμολύνονται από διάφορα άλλα είδη μικροοργανισμών (π.χ., άλλα μικροφύκη, βακτήρια, κλπ.) (Σχήμα 1.6). Με αυτόν τον τρόπο υπάρχει ο κίνδυνος αλλοίωσης της σύστασης των καλλιεργειών και απομάκρυνσης από την επιθυμητή εφαρμογή της μονοκαλλιέργειας (Day et al., 2011). Έντονες επιμολύνσεις οδηγούν ταυτόχρονα και σε μικρή παραγωγή βιομάζας ή ακόμη και σε αστοχία της καλλιέργειας, είτε λόγω επικράτησης στη δεξαμενή άλλων μικροοργανισμών ή λόγω εμφάνισης παρασιτικών ασθενειών στα κύτταρα (Day et al., 2011).

Επιπρόσθετα, στα ανοιχτά συστήματα παρατηρείται το φαινόμενο εξάτμισης και απώλειας σημαντικών ποσοτήτων νερού, με αποτέλεσμα την αύξηση στην καλλιέργεια της συγκέντρωσης ουσιών (κυρίως αλάτων) που μπορεί να επηρεάσουν τη φυσιολογική ανάπτυξη των μικροφυκών. Ο μοναδικός τρόπος αντιμετώπισης αυτού του προβλήματος είναι η συνεχής αναπλήρωση νερού στη δεξαμενή, καταλήγοντας στη χρήση μεγάλων ποσοτήτων του (Bilanovic et al., 2009). Το συγκεκριμένο ζήτημα μπορεί να περιοριστεί εάν χρησιμοποιηθεί υφάλμυρο ή αλμυρό νερό (π.χ., θαλάσσιο), ανάλογα όμως με το στέλεχος που καλλιεργείται και την εν γένει ανθεκτικότητα του στα άλατα. Συνεπώς, για τη συγκεκριμένη εφαρμογή μπορεί να χρησιμοποιηθεί μη πόσιμο και μη αρδεύσιμο νερό (Bilanovic et al., 2009).

Σε σχέση με τα κλειστού τύπου συστήματα καλλιέργειας, στα ανοιχτά συστήματα η παραγωγή βιομάζας ανά μονάδα επιφάνειας είναι σημαντικά μικρότερη. Επακόλουθο είναι η τελική συγκέντρωση της βιομάζας που επιτυγχάνεται να είναι σχετικά μικρή, χαρακτηριστικό που αυξάνει πολύ το κόστος συγκομιδής της και ενισχύει τις απαιτήσεις σε διαθέσιμες εκτάσεις για την εγκατάσταση των ανοικτών συστημάτων (Norsker et al., 2011). Παράλληλα, σε αρκετές περιοχές τα χρονικά διαστήματα χρήσης των ανοικτών συστημάτων είναι περιορισμένα, λόγω πιθανών έντονων εποχιακών διακυμάνσεων των περιβαλλοντικών συνθηκών ή χαμηλών θερμοκρασιών και ηλιοφάνειας. Για τον λόγο αυτό, χώρες με σημαντική διάρκεια και ένταση ηλιοφάνειας, όπως η Ελλάδα, η Ισπανία, η Ιταλία, το Ισραήλ, κ.ά., πλεονεκτούν στην πιθανότητα εγκατάστασης μίας ανοιχτής καλλιέργειας μικροφυκών. Έχει αποδειχθεί πως σε αυτές τις τοποθεσίες η παραγωγή βιομάζας μπορεί να είναι έως και δεκαπλάσια από την παραγωγή βιομάζας σε περιοχές με διαφορετικά χαρακτηριστικά (Brányiková et al., 2011).

Συμπερασματικά, τα κυριότερα μειονεκτήματα των ανοικτών συστημάτων είναι (Brennan and Owende, 2010):

- Απώλειες λόγω εξάτμισης του νερού.
- Θερμοκρασιακές μεταβολές λόγω της επίδρασης του περιβάλλοντος.
- Μικρή αποτελεσματικότητα στην αξιοποίηση του CO<sub>2</sub>.
- Αναποτελεσματική ανάδευση του υποστρώματος και της καλλιέργειας.
- Περιορισμένη αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας.



**Σχήμα 1.6.** Ανοιχτού τύπου καλλιέργειες μικροφυκών.

### **Κλειστού Τύπου Καλλιέργειες Μικροφυκών (PBRs)**

Στους κλειστού τύπου φωτό-βιοαντιδραστήρες (PBRs) απαιτείται συνήθως για την καλλιέργεια μικροφυκών μία τεχνητή πηγή φωτεινής ενέργειας. Συνεπώς, πρόκειται για συστήματα στα οποία τα μικροφύκη είναι μερικώς ή πλήρως απομονωμένα από το περιβάλλον, χωρίς να απαγορεύεται όμως η εγκατάστασή τους σε εξωτερικούς χώρους προκειμένου να αξιοποιηθεί μερικώς και το ηλιακό φως (Oncel, 2015).

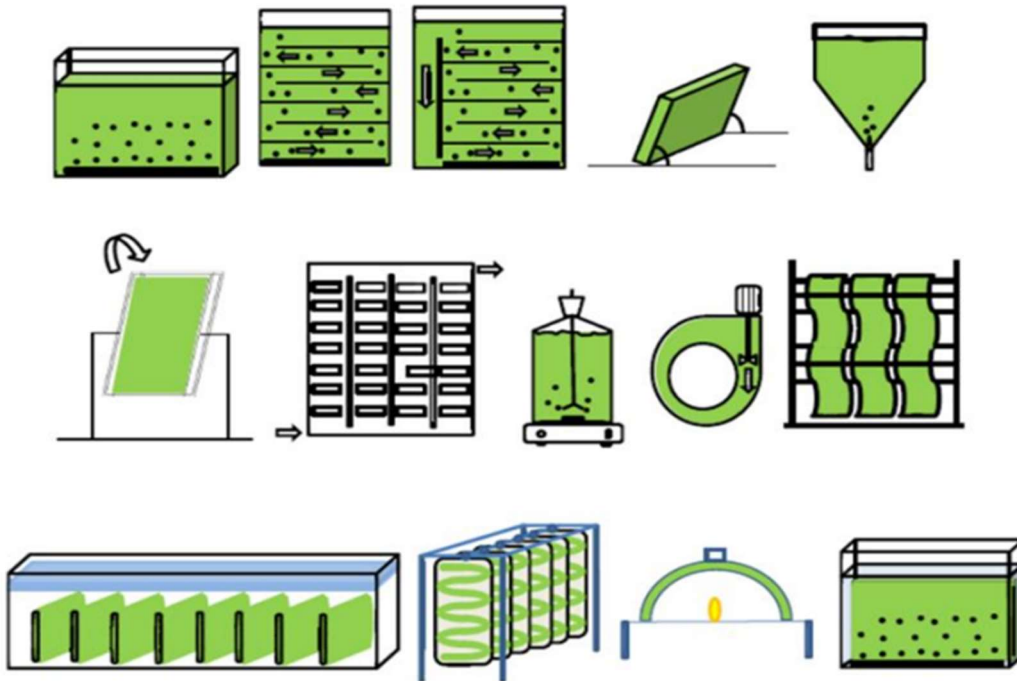
Οι φωτό-βιοαντιδραστήρες μπορούν να ταξινομηθούν γενικά σε ποικίλες κατηγορίες, ανάλογα τον σχεδιασμό/διαμόρφωση και τη λειτουργία τους. Με βάση μόνο τον σχεδιασμό τους, οι βασικοί τύποι PBRs είναι (α) επίπεδης πλάκας (Σχήμα 1.7), (β) αυλωτοί (Σχήμα 1.8) και (γ) κατακόρυφης στήλης (Σχήμα 1.9). Από την άλλη πλευρά, ανάλογα με τη λειτουργία τους κατατάσσονται στους (α) μονοφασικούς αντιδραστήρες (γεμάτοι με θρεπτικό μέσο καλλιέργειας, με την εναλλαγή αερίων να λαμβάνει χώρα σε ξεχωριστή διάταξη) και (β) αντιδραστήρες δύο φάσεων (οι δύο φάσεις συνυπάρχουν, με τη μεταφορά μάζας να πραγματοποιείται συνεχώς στο εσωτερικό του φωτό-βιοαντιδραστήρα) (Richmond, 2003). Επιπρόσθετα, η αξιοποίηση διαφορετικών υλικών κατασκευής των PBRs ορίζει περαιτέρω υποκατηγορίες, όπως για παράδειγμα φωτό-βιοαντιδραστήρες από πλαστικό ή γυαλί.

Θα πρέπει να τονιστεί πως ο σχεδιασμός και η βελτιστοποίηση των φωτό-βιοαντιδραστήρων είναι ένα ιδιαίτερος πολύπλοκο ζήτημα που προϋποθέτει την άρτια γνώση των φυσικών, βιοχημικών και βιολογικών φαινομένων. Τα κυριότερα υποσυστήματα των PBRs είναι το σύστημα φωτισμού, το σύστημα εμπλουτισμού με CO<sub>2</sub>, το σύστημα ανάδευσης, το σύστημα απομάκρυνσης O<sub>2</sub> και διαχωρισμού αερίων, το σύστημα θέρμανσης/ψύξης και το σύστημα τροφοδοσίας θρεπτικών συστατικών (Chisti and Moo-Young, 2002, Eriksen, 2008, Molina et al., 2001).

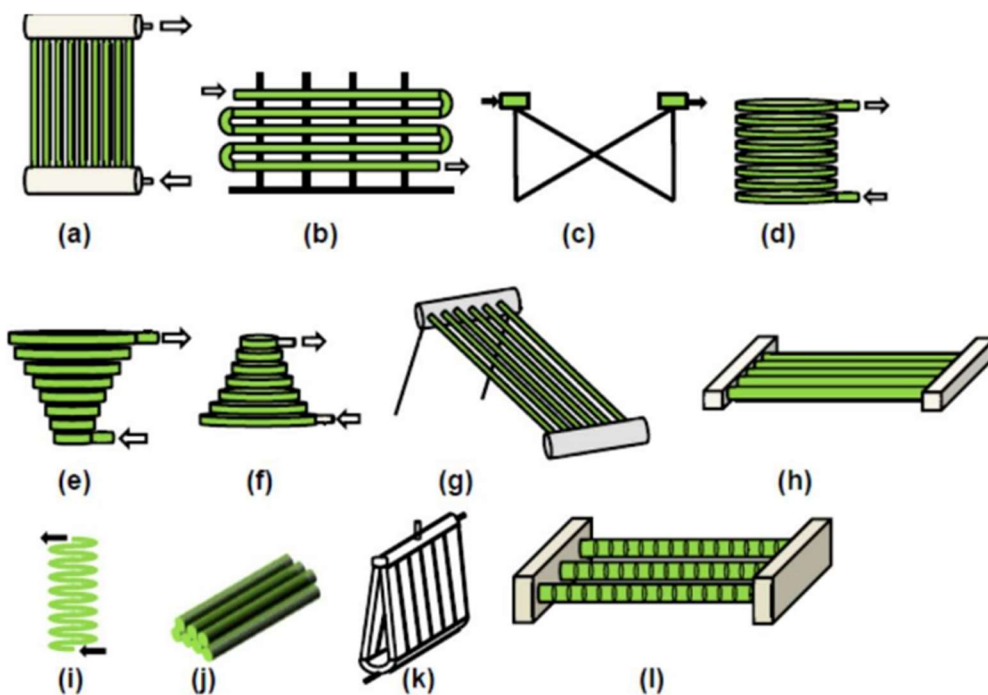
Σύμφωνα με τα προηγούμενα, τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα των φωτό-βιοαντιδραστήρων είναι (Μάρκου et al., 2013):

- Αποτελεσματικός έλεγχος των συνθηκών καλλιέργειας.
- Μεγαλύτερος διαθέσιμος λόγος επιφάνειας/όγκου.
- Καλύτερος έλεγχος της παροχής και μεταφοράς αερίων.
- Περιορισμός της εξάτμισης νερού από το υγρό υπόστρωμα της καλλιέργειας.

- Καλύτερη θερμική κατανομή στο υπόστρωμα της καλλιέργειας.
- Σχετικά εύκολη εγκατάσταση σε ανοιχτό χώρο, με μικρές σχετικά απαιτήσεις σε έκταση.
- Προστασία από επιμολύνσεις μικροοργανισμών.
- Υψηλές αποδόσεις παραγωγής βιομάζας και βιοχημικών συστατικών.

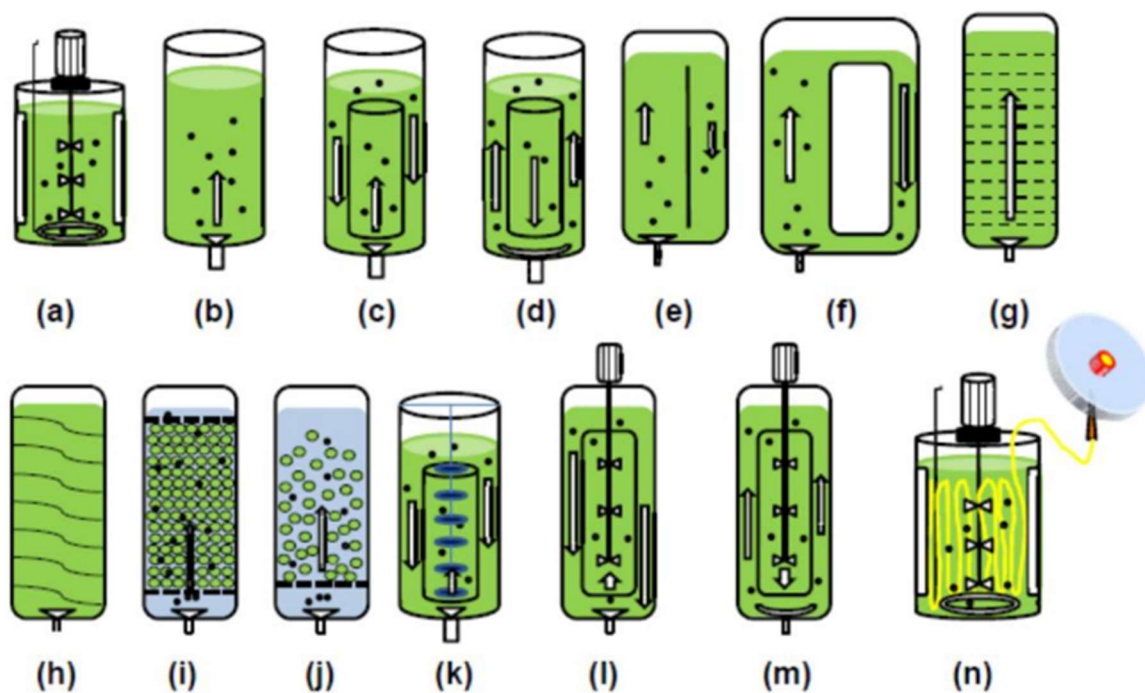


Σχήμα 1.7. Διαφορετικοί τύποι φωτό-βιοαντιδραστήρων επίπεδης πλάκας.



Σχήμα 1.8. Διαφορετικοί τύποι αυλωτών φωτό-βιοαντιδραστήρων.

Παρόλα τα πλεονεκτήματα των PBRs σε σχέση με τις ανοικτές δεξαμενές καλλιέργειας, τα συστήματα αυτά εμφανίζουν και διακριτά μειονεκτήματα, όπως είναι το υψηλό κόστος κατασκευής και λειτουργίας και η δυσκολία κλιμάκωσης σε μεγάλης δυναμικότητας εγκαταστάσεις (scale-up). Το γεγονός αυτό οφείλεται στην παραγωγή μοριακού  $O_2$  κατά τη φωτοσύνθεση και στην επακόλουθη αύξηση της συγκέντρωσης του διαλυμένου οξυγόνου στο υγρό υπόστρωμα της καλλιέργειας. Από τη στιγμή που το  $O_2$  δρα ανασταλτικά προς τα κύτταρα, ενώ μπορεί να προκαλέσει ακόμη και (φωτό)οξειδωση, θα πρέπει να απομακρύνεται από τον PBR. Ο συνδυασμός αυτής της παραμέτρου με άλλους λόγους, όπως η ένταση του φωτισμού, η συγκέντρωση της βιομάζας, ο ρυθμός παροχής του υγρού, κλπ., περιορίζουν σημαντικά τα μεγέθη των PBRs (Μάρκου et al., 2013).



**Σχήμα 1.9.** Διαφορετικοί τύποι φωτο-βιοαντιδραστήρων κατακόρυφης στήλης.

#### 1.4. Διεργασίες Επεξεργασίας Βιομάζας

Έπειτα του σταδίου καλλιέργειας των μικροφυκών και της παραγωγής βιομάζας σε ανοιχτά ή κλειστά συστήματα, ακολουθεί το στάδιο επεξεργασίας της. Γενικά, η επεξεργασία της βιομάζας μπορεί να ακολουθήσει δύο βασικές οδούς: (α) για εφαρμογές όπου τα μικροφύκη πρέπει να αξιοποιούνται εξολοκλήρου σε ξηρή μορφή, και (β) για εφαρμογές που απαιτείται η εξαγωγή από τη βιομάζα των χρήσιμων βιοχημικών συστατικών, χρησιμοποιώντας κατάλληλες τεχνολογίες συνήθως σε υγρή ή μερικώς αφυδατωμένη βιομάζα (Morais et al., 2020).

### **Αφυδάτωση και Ξήρανση Βιομάζας**

Καθώς τα κύτταρα μικροφυκών καλλιεργούνται σε υδατικό μέσο είναι απαραίτητο να εφαρμοστεί αμέσως μετά την καλλιέργεια τους ένα ή περισσότερα στάδια αφυδάτωσης της βιομάζας, με σκοπό την αύξηση της συγκέντρωσης της στο αιώρημα. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με μεθόδους όπως η επίπλευση, η καθίζηση, η φυγοκέντρηση, η διήθηση, η κροκίδωση, κ.ά. (Gorgich et al., 2020). Στη συνέχεια και εάν είναι απαραίτητο, εφαρμόζονται τεχνολογίες για την πλήρη ξήρανση της βιομάζας, συνήθως σε ένα στάδιο. Πολλές εφαρμογές, όπως η χρήση των μικροφυκών ως συμπλήρωμα διατροφής (συνήθως διατίθενται στο εμπόριο ως ξηρή σκόνη, πελλέτες, κάψουλες, σφαιρίδια/πλακίδια, κλπ.), ή ακόμη και η εκχύλιση των ενδοκυτταρικών λιπιδίων (π.χ., για την παραγωγή βιοντίζελ) έχουν ως προαπαιτούμενη την ξήρανση της βιομάζας σε τελική συγκέντρωση τουλάχιστον 90% w/w (Chen et al., 2015). Γενικά, η διαδικασία της ξήρανσης απαιτεί την κατανάλωση σημαντικής ποσότητας ενέργειας (ενδεικτικά, για εξάτμιση 1 kg H<sub>2</sub>O απαιτούνται περισσότερα από 800 kcal ενέργειας), με αποτέλεσμα την οικονομική δυσχέρεια ολόκληρης της μονάδας παραγωγής. Οι πιο κοινές μέθοδοι ξήρανσης της βιομάζας μικροφυκών περιλαμβάνουν την ψύξη και λυοφιλοποίηση, την ξήρανση σε διάταξη τυμπάνου, την ξήρανση με ψεκασμό και την ηλιακή ξήρανση (Grima et al., 2003).

### **Προεπεξεργασία και Εξαγωγή Βιοχημικών Συστατικών**

Αρχικά, οι μέθοδοι προεπεξεργασίας της βιομάζας χρησιμοποιούνται με σκοπό την αύξηση της αποτελεσματικότητας ανάκτησης των ενδοκυτταρικών συστατικών των μικροφυκών. Οι μέθοδοι προεπεξεργασίας μπορεί να είναι χημικές (π.χ., οξέα, βάσεις, υπερκρίσιμα ρευστά) (Lee et al., 2010, Grampon et al., 2013), φυσικές (π.χ., λυοφιλοποίηση, μικροκύματα, υπέρηχοι) (Adam et al., 2012, Biller et al., 2013), βιολογικές (π.χ., ενζυμική αποικοδόμηση) (Kita et al., 2010, Mercer and Armenta, 2011) και μηχανικές (π.χ., αυτόκλειστο υψηλής θερμοκρασίας και πίεσης, άλεση, ομογενοποίηση) (Lee et al., 2012, McMillan et al., 2013). Σημαντική παράμετρο για την επιλογή της μεθόδου προεπεξεργασίας της βιομάζας αποτελεί η διατήρηση της χημικής της σύστασης, δεδομένου ότι οι βιοχημικές ενώσεις της βιομάζας μπορούν να υποβαθμιστούν υπό έντονες συνθήκες (Chen et al., 2015).

Στο επόμενο στάδιο, από τις τεχνολογίες εξαγωγής και ανάκτησης των επιθυμητών βιοχημικών συστατικών της βιομάζας ξεχωρίζει η εκχύλιση. Αυτή μπορεί να εφαρμοστεί χρησιμοποιώντας οργανικούς ή μη οργανικούς διαλύτες (Morais et al., 2020). Οι κύριες παράμετροι που επηρεάζουν την επιλογή της καταλληλότερης διεργασίας εκχύλισης, ανάλογα με το στοχευμένο συστατικό, είναι τα βιολογικά χαρακτηριστικά των κυττάρων, η προβλεπόμενη τελική εφαρμογή των εκχυλιζόμενων συστατικών, η επάρκεια και η επίδραση του διαλύτη που θα χρησιμοποιηθεί, η αναμενόμενη απόδοση και ο χρόνος εκχύλισης, το κόστος και η ευκολία της συνολικής επεξεργασίας, και η δυνατότητα ανακύκλωσης και επαναχρησιμοποίησης του διαλύτη (Cuellar-Bermudez et al., 2014).

## 1.5. Παραγωγή Βιοπροϊόντων και Εφαρμογές Μικροφυκών

Κατά το παρόν, τα μικροφύκη (με κυριότερα τα στελέχη που ανήκουν στα γένη *Chlorella*, *Dunaliella*, *Arthrospira*, *Nannochloropsis*, *Isochrysis*, *Haematococcus* και *Schizochytrium*) καλλιεργούνται σε παγκόσμιο επίπεδο με σκοπό την εφαρμογή τους σε τομείς όπως αυτοί των τροφίμων, της κοσμετολογίας, της φαρμακευτικής και γενικότερα της βιομηχανίας (Μάρκου et al., 2013).

Αρκετά στελέχη μικροφυκών αξιοποιούνται για την παραγωγή βιομάζας ως συστατικό συμπληρωμάτων διατροφής, με υψηλά επίπεδα πρωτεϊνών, ω-λιπαρών οξέων, βιταμινών, ανόργανων στοιχείων, αμινοξέων, κλπ. Τα συγκεκριμένα προϊόντα βρίσκουν εφαρμογή τόσο στην ανθρώπινη διατροφή, όσο και στη διατροφή ζώων και ψαριών (Μάρκου et al., 2013). Ενδεικτικά, ως τροφή υδατοκαλλιεργειών και ζωοτροφές, τα μικροφύκη μπορούν να επηρεάσουν θετικά τη φυσιολογία των ψαριών και ζώων, και συγκεκριμένα να ενισχύσουν τον ρυθμό επιβίωσης, την ανάπτυξη και τη γονιμότητα τους. Ανάλογη θετική επίδραση έχουν και στον ανθρώπινο οργανισμό.

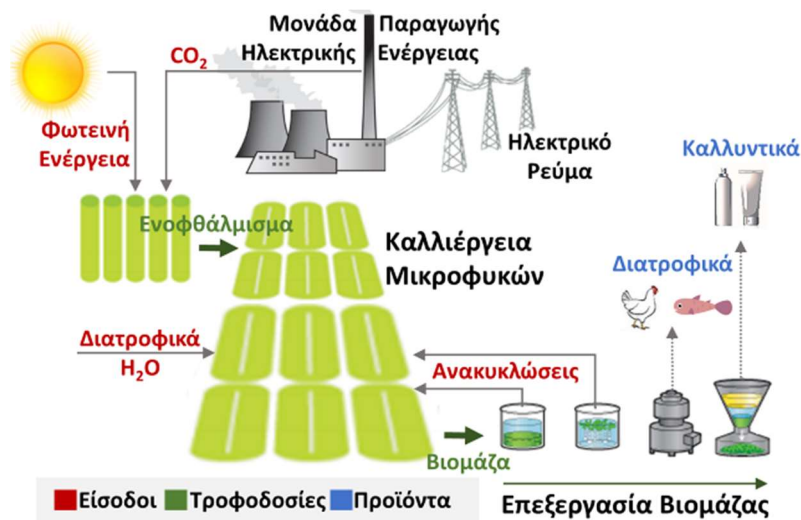
Επιπλέον, πολλά από τα βιοχημικά συστατικά των μικροφυκών έχουν φαρμακευτική αξία, καθώς είτε δρουν ως αντιοξειδωτικά ή ενισχύουν το ανοσοποιητικό και το νευρικό σύστημα του ανθρώπου και των ζώων. Πιο συγκεκριμένα, οι βιοδραστικές ενώσεις των μικροφυκών, όπως είναι οι βιταμίνες E και η B12, το καροτένιο, η φυκοκυανίνη, κλπ., εμφανίζουν ένα ευρύ φάσμα ιδιοτήτων που περιλαμβάνουν αντιοξειδωτικές, αντιπηκτικές, αντικαρκινικές, αντιφλεγμονώδεις, αντιβακτηριακές, αντιακές, αντιυπερτασικές και άλλες δράσεις με δυνατότητα μείωσης και πρόληψης ασθενειών (Barrow and Shahidi, 2007, Mata et al. 2010). Η εκμετάλλευση των συγκεκριμένων βιοδραστικών ενώσεων των μικροφυκών πραγματοποιείται και στη βιομηχανία των καλλυντικών προϊόντων, καθώς έχουν αναπτυχθεί πολυάριθμες φόρμουλες για εξομάλυνση και αναζωογόνηση του δέρματος, των μαλλιών, κ.ά. (Morais et al., 2014).

Παράλληλα, τα μικροφύκη καλλιεργούνται και για την παραγωγή συστατικών για γενική βιομηχανική χρήση. Τα σημαντικότερα παραδείγματα αυτών των εφαρμογών είναι συγκεκριμένες χρωστικές ουσίες, όπως η χλωροφύλλη, η φυκοκυανίνη, τα καροτενοειδή (π.χ., ασταξανθίνη, β-καροτένιο), κλπ. (Ψαχουλιά, 2018). Αυτές οι χρωστικές μπορούν να εφαρμοστούν κυρίως στη βιομηχανία τροφίμων, στη φαρμακευτική βιομηχανία, στη βιομηχανία καλλυντικών και στην κλωστοϋφαντουργική βιομηχανία.

Μία επίσης σημαντική εφαρμογή των μικροφυκών είναι η παραγωγή λιπασμάτων και εδαφοβελτιωτικών παραγόντων, λόγω της ικανότητας της βιομάζας τους να κατακρατά μεγάλες ποσότητες νερού, να βελτιώνει τα δομικά και ποιοτικά χαρακτηριστικά του εδάφους και να δεσμεύει το άζωτο από την ατμόσφαιρα και να το μετατρέπει σε οργανική μορφή (συγκεκριμένα για αζωτούχα λιπάσματα που εφαρμόζονται σε απαιτητικές καλλιέργειες) (Pulz and Gross, 2004, Pulz et al., 2008, Spolaore et al., 2006).

## 1.6. Αντικείμενο, Στόχοι και Διάρθρωση της Εργασίας

Από τη στιγμή που έχει αποδειχθεί πως η βιομάζα μικροφυκών αποτελεί σήμερα βασική ανανεώσιμη πρώτη ύλη για την παραγωγή πολλαπλών βιοχημικών προϊόντων, κυρίως στα πλαίσια των βιοδιυλιστηρίων 3<sup>ης</sup> γενιάς (Σχήμα 1.10), είναι αναμενόμενο πως αυτή η πρακτική θα έχει μεγάλο θετικό περιβαλλοντικό αντίκτυπο. Ο αντίκτυπος αυτός θα ενισχυθεί περαιτέρω εάν η καλλιέργεια μικροφυκών λάβει χώρα με ταυτόχρονη δέσμευση και μετατροπή σημαντικών ποσοτήτων CO<sub>2</sub> από αέρια απόβλητα, όπως αυτά που προέρχονται από εγκαταστάσεις καύσης των μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (Δ.Ε.Η., 2021). Παρόλα αυτά, έως και σήμερα συγκεκριμένα τεχνολογικά και οικονομικά εμπόδια αποτρέπουν την αειφόρο λειτουργία των βιοδιυλιστηρίων 3<sup>ης</sup> γενιάς σε βιομηχανική κλίμακα.



Σχήμα 1.10. Η γενική ιδέα ενός βιοδιυλιστηρίου 3<sup>ης</sup> γενιάς.

Σε αυτό το πλαίσιο, η παρούσα εργασία εστιάζει στη μελέτη μίας ολοκληρωμένης μονάδας καλλιέργειας μικροφυκών, παραγωγής και επεξεργασίας βιομάζας και διαχωρισμού και καθαρισμού πολλαπλών βιοχημικών προϊόντων, συγκεκριμένα πρωτεϊνών, υδατανθράκων, λιπαρών οξέων και φυκοκυανίνης. Η μελέτη πραγματοποιείται στα επίπεδα της τεχνικό-οικονομικής ανάλυσης και βελτιστοποίησης της συγκεκριμένης μονάδας με σκοπό:

- Την αξιοποίηση ενός ιδιαίτερου υποσχόμενου στελέχους μικροφυκών, συγκεκριμένα της *Arthrospira*, ικανού να συσσωρεύει τα τέσσερα βιοχημικά προϊόντα ενδιαφέροντος.
- Τη σύνδεση του βιοδιυλιστηρίου 3<sup>ης</sup> γενιάς με τα αερία μίας μονάδας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας της Δ.Ε.Η., με στόχο τη δέσμευση και την αξιοποίηση του παραγόμενου CO<sub>2</sub>.
- Τον σχεδιασμό, την προσομοίωση και τη βελτιστοποίηση ενός αυλωτού φωτό-βιοαντιδραστήρα (PBR) καλλιέργειας μικροφυκών.

- Την ανάλυση των μεθόδων αφυδάτωσης και επεξεργασίας της βιομάζας και των τεχνολογιών ανάκτησης των βιοχημικών συστατικών.
- Την ελαχιστοποίηση των οικονομικών και ενεργειακών απαιτήσεων των σταδίων παραγωγής και διαχωρισμού της βιομάζας, καθώς και αυτών ανάκτησης και καθαρισμού των βιοχημικών συστατικών.
- Τη μείωση του παγίου κόστους εγκατάστασης της ολοκληρωμένης μονάδας και του λειτουργικού κόστους παραγωγής των πολλαπλών προϊόντων.
- Τον εντοπισμό των σημαντικότερων παραμέτρων που επηρεάζουν το οικονομικό και περιβαλλοντικό αποτύπωμα της μονάδας.
- Την ανάλυση αειφορίας της ολοκληρωμένης αλυσίδα αξίας σε βιομηχανική κλίμακα.

Η παρούσα εργασία διαρθρώνεται σε πέντε (5) επιμέρους κεφάλαια. Στο Κεφάλαιο 1 πραγματοποιήθηκε ήδη μία γενική εισαγωγή στη σύγχρονη τεχνολογία μικροφυκών και παρουσιάστηκαν οι κεντρικοί στόχοι της εργασίας. Στο Κεφάλαιο 2 καταγράφεται αναλυτικά η μεθοδολογία που χρησιμοποιείται για τον σχεδιασμό του διαγράμματος ροής και των επιμέρους σταδίων, καθώς επίσης αναλύονται τα ισοζύγια μάζας και ενέργειας για ένα κεντρικό σενάριο λειτουργίας της μονάδας. Στο Κεφάλαιο 3 πραγματοποιείται η προκαταρκτική τεχνική και οικονομική ανάλυση της μονάδας για το κεντρικό σενάριο, προσδιορίζοντας αναλυτικά το πάγιο και λειτουργικό κόστος, καθώς και κατάλληλους οικονομικούς και περιβαλλοντικούς δείκτες αξιολόγησης. Στο Κεφάλαιο 4 γίνεται ανάλυση ευαισθησίας για τον εντοπισμό των σημαντικότερων λειτουργικών παραμέτρων, ενώ η προσπάθεια βελτιστοποίησης των οικονομικών και περιβαλλοντικών δεικτών στηρίζεται στην ανάλυση διαφορετικών σεναρίων παραγωγής. Το κύριο μέρος της εργασίας ολοκληρώνεται στο Κεφάλαιο 5 με τα εξαγόμενα από τη μελέτη συμπεράσματα και τις μελλοντικές προτάσεις.

Τέλος, θα πρέπει να σημειωθεί πως για την ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας χρησιμοποιούνται αρκετά πειραματικά δεδομένα που έχουν παραχθεί στο ερευνητικό Έργο «*Βιομετατροπή του CO<sub>2</sub> σε Βιοπροϊόντα Υψηλής Αξίας μέσω Αειφόρων Καλλιεργειών Μικροφυκών – CO<sub>2</sub>-BioProducts*», το οποίο συγχρηματοδοτήθηκε από την Ευρωπαϊκή Ένωση και εθνικούς πόρους μέσω του Ε.Π. Ανταγωνιστικότητα, Επιχειρηματικότητα & Καινοτομία (ΕΠΑνεΚ 2014-2020), Δράση «ΕΡΕΥΝΩ – ΔΗΜΙΟΥΡΓΩ – ΚΑΙΝΟΤΟΜΩ» (κωδικός Έργου: Τ1ΕΔΚ-02681). Οι εταίροι του Έργου οι εξής: (1) Εθνικό Κέντρο Έρευνας και Τεχνολογικής Ανάπτυξης, Ινστιτούτο Χημικών Διεργασιών και Ενεργειακών Πόρων (Ε.Κ.Ε.Τ.Α.), (2) Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος (ΠΟΛ.Κ.), (3) Εθνικό Ίδρυμα Ερευνών, Ινστιτούτο Χημικής Βιολογίας (Ε.Ι.Ε.), (4) Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα Βιολογίας (Ε.Κ.Π.Α.), (5) Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Βιολογίας (Α.Π.Θ.), (6) Εθνικό Κέντρο Έρευνας Φυσικών Επιστημών «Δημόκριτος» (Ε.Κ.Ε.Φ.Ε «Δ»), (7) Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού Α.Ε., Διεύθυνση Περιβάλλοντος (Δ.Ε.Η.), και (8) ΑΛΓΗ Α.Ε.Γ.Ε. (ΑΛΓΗ).



## Κεφάλαιο 2:

# Μεθοδολογία Τεχνικό-Οικονομικής Ανάλυσης

### 2.1. Περιγραφή του Διαγράμματος Ροής

Στα πλαίσια της συγκεκριμένης εργασίας, σκοπός είναι να σχεδιαστεί με -όσο το δυνατόν μεγαλύτερη λεπτομέρεια- μία ολοκληρωμένη μονάδα καλλιέργειας βιομάζας μικροφυκών και ταυτόχρονης παραγωγής και ανάκτησης πολλαπλών βιοχημικών προϊόντων, συγκεκριμένα σακχάρων, πρωτεϊνών, λιπιδίων και φυκοκυανίνης. Όπως μπορεί να φανεί στο αναλυτικό διάγραμμα ροής που παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.1, βασικές πρώτες ύλες της μονάδας, ως τροφοδοσία, αποτελούν: (α) τα απαέρια μίας μονάδας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας της Δημόσιας Επιχείρησης Ηλεκτρισμού (Δ.Ε.Η.), τα οποία περιέχουν μεταξύ άλλων αερίων και διοξείδιο του άνθρακα (CO<sub>2</sub>), (β) η απαραίτητη ποσότητα μικροφυκών, ως προκαλλιέργεια του φωτό-βιοαντιδραστήρα, (γ) ατμοσφαιρικός αέρας για τη ρύθμιση της αναλογίας CO<sub>2</sub> στην καλλιέργεια μικροφυκών, (δ) νερό για την πλήρωση του φωτό-βιοαντιδραστήρα και (ε) θρεπτικά συστατικά/διατροφικά για την ανάπτυξη των κυττάρων των μικροφυκών. Θα πρέπει να σημειωθεί πως το CO<sub>2</sub> που περιέχεται στα καυσαέρια της μονάδας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας αποτελεί τη μοναδική πηγή άνθρακα για τα μικροφύκη, ενώ το επιλεγμένο στέλεχος αυτών για τη μονάδα είναι το *Arthrospira sp.* (*Spirulina*). Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, το συγκεκριμένο στέλεχος παρουσιάζει μία σειρά πλεονεκτημάτων, όπως το εξαιρετικό προφίλ θρεπτικών συστατικών που παρέχει (π.χ., πρωτεΐνες, υδατάνθρακες, χρωστικές ουσίες), μέσω των οποίων συνεισφέρει στην ισορροπημένη διατροφή του ανθρώπου και κατά επέκταση σε συγκεκριμένα οφέλη όπως η απώλεια βάρους, η καλή υγεία του εντέρου, ο έλεγχος του διαβήτη, η μείωση της χοληστερίνης και της πίεσης του αίματος, η ενίσχυση του μεταβολισμού και η αντιοξειδωτική δράση (Burgess et al., 2018).

### 2.2. Στάδια της Ολοκληρωμένης Μονάδας

Με βάση το διάγραμμα ροής του Σχήματος 2.1, η ολοκληρωμένη μονάδα καλλιέργειας μικροφυκών και παραγωγής βιοχημικών προϊόντων μπορεί να χωριστεί σε επτά στάδια.

#### Στάδιο I – Προεπεξεργασία Αέριων Ρύπων

Στο πρώτο στάδιο, τα απαέρια καύσης της μονάδας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας εισέρχονται σε μία στήλη προσρόφησης αρκετά μεγάλης δυναμικότητας, με στόχο τη δέσμευση και τον διαχωρισμό του CO<sub>2</sub> από το μίγμα των υπολοίπων απαερίων. Ενώ τα υπόλοιπα απαέρια μπορούν να οδηγηθούν προς απελευθέρωση ή επιπλέον επεξεργασία

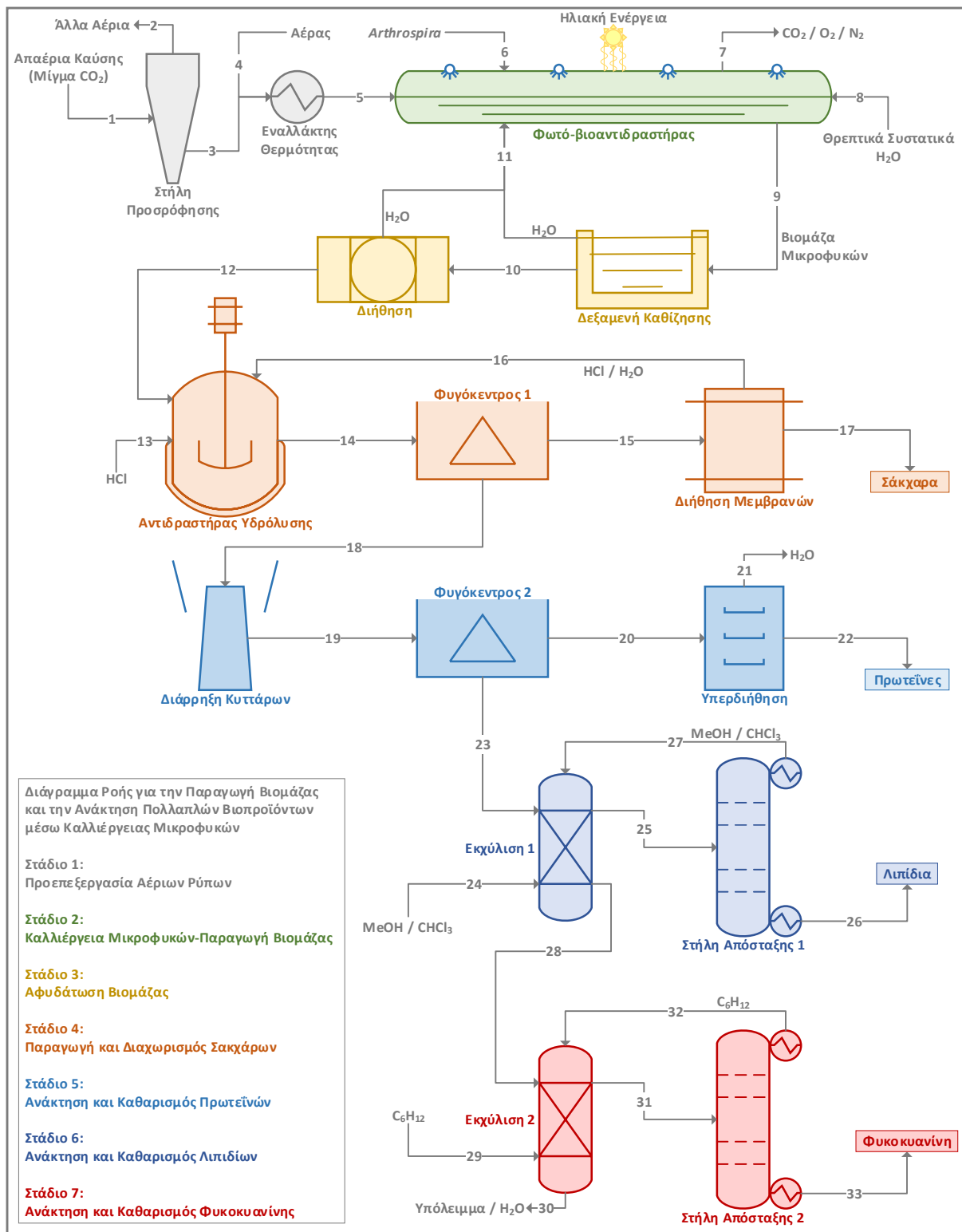
σε κάποια εξωτερική διεργασία, η ποσότητα CO<sub>2</sub> που διαχωρίζεται και εξέρχεται από τη στήλη προσρόφησης αναμιγνύεται με κατάλληλη ποσότητα αέρα (αρκετές φορές μεγαλύτερη) με σκοπό τη ρύθμιση της αναλογίας του CO<sub>2</sub> στο νέο αέριο ρεύμα τροφοδοσίας στην τιμή 1/9. Αμέσως μετά, το νέο αυτό ρεύμα αέρα/CO<sub>2</sub>, πριν την τροφοδοσία του στον φωτό-βιοαντιδραστήρα, εισέρχεται σε έναν εναλλάκτη θερμότητας προκειμένου να μειωθεί η θερμοκρασία του.

### **Στάδιο II – Καλλιέργεια Μικροφυκών-Παραγωγή Βιομάζας**

Το ρεύμα που εξέρχεται από τον εναλλάκτη θερμότητας εισέρχεται σε ένα αυλωτό φωτό-βιοαντιδραστήρα κλειστού τύπου (PBR), όπου πραγματοποιείται η καλλιέργεια των μικροφυκών και η παραγωγή της επιθυμητής βιομάζας. Σε αυτό το σημείο εισάγονται στον φωτό-βιοαντιδραστήρα η προκαλλιέργεια του στελέχους *Arthrospira*, η απαιτούμενη ποσότητα νερού και τα απαραίτητα για την ανάπτυξη των μικροφυκών θρεπτικά συστατικά (κυρίως χλωριούχο αμμώνιο -NH<sub>4</sub>Cl-, το οποίο αποτελεί τη μοναδική πηγή αζώτου των κυττάρων). Σε συνδυασμό με την παροχή ενέργειας μέσω της ηλιακής ακτινοβολίας, αποτέλεσμα είναι η ανάπτυξη και ο πολλαπλασιασμός των κυττάρων των μικροφυκών, μέσω της διαδικασίας της φωτοσύνθεσης, υπό την αυτότροφη λειτουργία του φωτό-βιοαντιδραστήρα. Η παραγόμενη βιομάζα μικροφυκών, η οποία εξέρχεται από τον φωτό-βιοαντιδραστήρα ως υγρό αιώρημα, αποτελεί το ρεύμα που οδηγείται προς επεξεργασία στα επόμενα στάδια της μονάδας. Ταυτόχρονα, από τον φωτό-βιοαντιδραστήρα εξέρχεται το σύνολο της ποσότητας των αερίων που έχουν παραχθεί, απομείνει ή δεν έχουν αντιδράσει (αντίστοιχα, O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>) προς το περιβάλλον. Τέλος, προκειμένου να διατηρείται σταθερή η θερμοκρασία του φωτό-βιοαντιδραστήρα, έχει ενσωματωθεί ένα εξωτερικό σύστημα ψύξης ψεκασμού, το οποίο ψεκάζει με (θαλασσινό) νερό την επιφάνεια του φωτό-βιοαντιδραστήρα, κυρίως κατά τους καλοκαιρινούς μήνες.

### **Στάδιο III – Αφυδάτωση Βιομάζας**

Το υγρό ρεύμα εξόδου από τον φωτό-βιοαντιδραστήρα, το οποίο περιέχει το αιώρημα της βιομάζας μικροφυκών σε νερό, εισέρχεται αρχικά σε μία δεξαμενή καθίζησης, με σκοπό ένα σημαντικό τμήμα της ποσότητας του νερού να διαχωριστεί από τη βιομάζα. Η ποσότητα νερού που ανακτάται επιστρέφει στον φωτό-βιοαντιδραστήρα μέσω του πρώτου ρεύματος ανακύκλωσης. Το ρεύμα βιομάζας μικροφυκών με το υπολειπόμενο νερό εξέρχεται από τη δεξαμενή καθίζησης και εισέρχεται σε μία συσκευή διήθησης. Στη διεργασία της διήθησης πραγματοποιείται επιπλέον διαχωρισμός νερού από τη βιομάζα. Η ποσότητα του νερού που διαχωρίζεται εξέρχεται από τη συσκευή διήθησης και επιστρέφει επίσης στον φωτό-βιοαντιδραστήρα μέσω του δεύτερου ρεύματος ανακύκλωσης. Θα πρέπει να σημειωθεί πως το ρεύμα εξόδου από τη στήλη διήθησης βρίσκεται σε μεγαλύτερη θερμοκρασία, λόγω της λειτουργίας ενός εναλλάκτη θερμότητας, ο οποίος καλείται μανδύας διήθησης, και έχει εισαχθεί προκειμένου να επιτευχθεί η κατάλληλη θερμοκρασία λειτουργίας.



**Σχήμα 2.1.** Διάγραμμα ροής της ολοκληρωμένης μονάδας καλλιέργειας μικροφυκών και παραγωγής πολλαπλών βιοχημικών προϊόντων: (i) σάκχαρα, (ii) πρωτεΐνες, (iii) λιπίδια και (iv) φυκοκυανίνη.

**Στάδιο IV – Παραγωγή και Διαχωρισμός Σακχάρων**

Το θερμό και σχεδόν αφυδατωμένο ρεύμα βιομάζας μικροφυκών εισέρχεται σε έναν αντιδραστήρα υδρόλυσης, όπου τροφοδοτείται και ένα αραιό υδατικό ρεύμα υδροχλωρικού οξέος (HCl). Ο ρόλος του HCl στον αντιδραστήρα είναι να πραγματοποιήσει (υπό σχετικά υψηλή πίεση) την αντίδραση υδρόλυσης των υδατανθράκων που έχουν συσσωρευτεί στη βιομάζα σε μονομερή σάκχαρα, με τελικό πρότυπο προϊόν τη γλυκόζη. Το ρεύμα εξόδου από τον αντιδραστήρα που περιέχει τα υδρολυμένα σάκχαρα και τα υπόλοιπα συστατικά της βιομάζας εισέρχεται σε έναν φυγοκεντρικό διαχωριστή (φυγοκεντρητή). Ο φυγοκεντρητής διαχωρίζει τα μονομερή σάκχαρα (γλυκόζη), μαζί με τη μικρή υπολειπόμενη ποσότητα νερού και υδροχλωρίου από τα άλλα συστατικά της βιομάζας. Το ρεύμα γλυκόζης, με χαμηλότερη πλέον τιμή πίεσης, οδηγείται σε μία στήλη διήθησης μεμβρανών. Θα πρέπει να αναφερθεί πως λόγω της επίδρασης της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος και της χαμηλής θερμομονωτικής ιδιότητας των σωληνώσεων, σε αυτή τη διεργασία παρατηρείται μείωση της θερμοκρασίας. Από τη διήθηση μεμβρανών διαχωρίζεται και εξέρχεται ένα ρεύμα γλυκόζης, το οποίο αποτελεί το πρώτο τελικό προϊόν της ολοκληρωμένης μονάδας, και ένα ρεύμα HCl και H<sub>2</sub>O, το οποίο επιστρέφει στον αντιδραστήρα υδρόλυσης μέσω κατάλληλου ρεύματος ανακύκλωσης.

**Στάδιο V – Ανάκτηση και Καθαρισμός Πρωτεϊνών**

Το ρεύμα εξόδου από τον φυγοκεντρικό διαχωριστή, το οποίο περιέχει τα υπόλοιπα συστατικά της βιομάζας μικροφυκών, εισάγεται σε έναν ομογενοποιητή ώστε να λάβει χώρα η διαδικασία διάρρηξης των κυτταρικών μεμβρανών και απελευθέρωσης στο αιώρημα των πρωτεϊνών, λιπιδίων και της φυκοκυανίνης. Η διεργασία της ομογενοποίησης απαιτεί την αύξηση της πίεσης σε υψηλές τιμές, ενώ παράλληλα πραγματοποιείται μείωση της θερμοκρασίας λόγω της επίδρασης της θερμοκρασίας περιβάλλοντος. Το ρεύμα των συστατικών της βιομάζας που εξέρχεται από τον ομογενοποιητή εισέρχεται στον δεύτερο φυγοκεντρικό διαχωριστή της μονάδας. Ο φυγοκεντρητής διαχωρίζει τις πρωτεΐνες μαζί με τη μικρή ποσότητα νερού που έχει ακολουθήσει το συγκεκριμένο ρεύμα από τα υπόλοιπα συστατικά. Η λειτουργία της φυγοκέντρωσης γίνεται υπό χαμηλότερη πίεση. Το ρεύμα των πρωτεϊνών εισέρχεται στη συνέχεια σε μία στήλη υπερδιήθησης, με σκοπό την απομάκρυνση της ποσότητας νερού και τη συμπύκνωση του ρεύματος των πρωτεϊνών. Ακολουθεί η έξοδος του ρεύματος των πρωτεϊνών ως το δεύτερο τελικό προϊόν της ολοκληρωμένης μονάδας και η έξοδος του ρεύματος νερού προς το περιβάλλον.

**Στάδιο VI – Ανάκτηση και Καθαρισμός Λιπιδίων**

Το ρεύμα εξόδου από τον δεύτερο φυγοκεντρικό διαχωριστή που περιέχει πλέον τα λιπίδια, τη φυκοκυανίνη και την υπολειπόμενη βιομάζα τροφοδοτείται σε μία στήλη εκχύλισης. Στη διεργασία αυτή πραγματοποιείται διαχωρισμός των λιπιδίων από τα υπόλοιπα συστατικά, χρησιμοποιώντας ένα ρεύμα κατάλληλου μίγματος διαλυτών μεθανόλης/χλωροφορμίου

(MeOH/CH<sub>3</sub>Cl). Σε αυτό το σημείο διαχωρίζονται τα λιπίδια με το μίγμα διαλυτών και μία μικρή ποσότητα νερού από τα υπόλοιπα στοιχεία. Το ρεύμα που εξέρχεται από τη στήλη εκχύλισης και περιέχει τα λιπίδια και το μίγμα διαλυτών εισέρχεται σε μία στήλη απόσταξης, όπου λαμβάνει χώρα ο διαχωρισμός των λιπιδίων από τα υπόλοιπα συστατικά. Ως αποτέλεσμα, προκύπτει από την απόσταξη ένα ρεύμα εξόδου λιπιδίων ως το τρίτο τελικό προϊόν της μονάδας και ένα ρεύμα ανακύκλωσης μίγματος MeOH/CH<sub>3</sub>Cl, το οποίο επανέρχεται στη στήλη εκχύλισης.

### **Στάδιο VII – Ανάκτηση και Καθαρισμός Φυκοκυανίνης**

Το δεύτερο ρεύμα εξόδου από τη στήλη εκχύλισης, στο οποίο περιέχονται πλέον μόνο η φυκοκυανίνη και η υπολειπόμενη βιομάζα, οδηγείται σε μία νέα στήλη εκχύλισης. Στην ίδια στήλη τροφοδοτείται και ένα ρεύμα εξανίου ως διαλύτης της φυκοκυανίνης. Στη συγκεκριμένη διεργασία πραγματοποιείται διαχωρισμός του διαλύματος φυκοκυανίνη-εξάνιο από το αιώρημα της υπολειπόμενης βιομάζας με τη μικρή ποσότητα νερού που την έχει ακολουθήσει. Ως αποτέλεσμα προκύπτει ένα ρεύμα εξόδου υπολείμματος βιομάζας και νερού προς το περιβάλλον και ένα ρεύμα εξόδου φυκοκυανίνης και εξανίου, το οποίο οδηγείται προς διαχωρισμό σε μία νέα στήλη απόσταξης. Στη στήλη απόσταξης γίνεται ο διαχωρισμός της φυκοκυανίνης από το εξάνιο, με αποτέλεσμα να εξέρχεται ένα ρεύμα φυκοκυανίνης ως το τέταρτο προϊόν της ολοκληρωμένης μονάδας και ένα ρεύμα εξανίου, το οποίο επανέρχεται στη στήλη εκχύλισης μέσω κατάλληλης ανακύκλωσης.

### **2.3. Σχεδιασμός των Επιμέρους Διεργασιών**

Στα πλαίσια του αναλυτικού σχεδιασμού της μονάδας καλλιέργειας μικροφυκών και παραγωγής πολλαπλών βιοχημικών προϊόντων και σύμφωνα με το διάγραμμα ροής του Σχήματος 2.1, η μονάδα αποτελείται συνολικά από 15 διεργασίες, εκ των οποίων 2 είναι χημικές και 13 φυσικές (Πίνακας 2.1). Σε ότι ακολουθεί, περιγράφεται συνοπτικά η αρχή λειτουργίας κάθε διεργασίας, ενώ παρουσιάζεται και η μεθοδολογία σχεδιασμού της. Συγκεκριμένα, καταγράφεται για κάθε μία από τις σημαντικότερες συσκευές της μονάδας η βασική εξίσωση σχεδιασμού της, καθώς επίσης και οι παράμετροι και μεταβλητές που εισέρχονται σε αυτή, όπως και οι τιμές που χρησιμοποιούνται για την επίλυση της. Θα πρέπει να αναφερθεί πως οι τιμές των παραμέτρων και μεταβλητών που βρίσκονται μέσα στις αντίστοιχες παρενθέσεις μπορεί να είναι σταθερές ή να μεταβάλλονται ανάλογα με τη δυναμικότητα της μονάδας. Στην περίπτωση που οι τιμές είναι σταθερές, αυτό τονίζεται ξεκάθαρα μετά την κάθε τιμή, ενώ στην περίπτωση που οι τιμές μεταβάλλονται, καταγράφεται η τιμή που αντιστοιχεί στο κεντρικό σενάριο μελέτης της συγκεκριμένης εργασίας, το οποίο ορίζεται ως Σενάριο Ι, δηλαδή σε δυναμικότητα βιομάζας ίση με 1.000 t<sub>n</sub>/yr (ή 3.076 kg/day).

**Πίνακας 2.1.** Κατάταξη των επιμέρους διεργασιών του διαγράμματος ροής του Σχήματος 2.1 σε χημικές και φυσικές διεργασίες.

| Χημικές Διεργασίες      | Φυσικές Διεργασίες    |
|-------------------------|-----------------------|
| Φωτό-βιοαντιδραστήρας   | Στήλη προσρόφησης     |
| Αντιδραστήρας υδρόλυσης | Εναλλάκτης θερμότητας |
|                         | Δεξαμενή καθίζησης    |
|                         | Συσκευή διήθησης      |
|                         | Φυγοκεντρητής 1       |
|                         | Διήθηση μεμβρανών     |
|                         | Διάρρηξη κυττάρων     |
|                         | Φυγοκεντρητής 2       |
|                         | Υπερδιήθηση           |
|                         | Στήλη εκχύλισης 1     |
|                         | Στήλη απόσταξης 1     |
|                         | Στήλη εκχύλισης 2     |
|                         | Στήλη απόσταξης 2     |

### Στήλη Προσρόφησης

Κατά τη διεργασία της προσρόφησης εξασφαλίζεται μία δυναμική ισορροπία φάσεων για την κατανομή της προσροφημένης ουσίας μεταξύ του ρευστού και της επιφάνειας του προσροφητικού υλικού (Σχήμα 2.2). Στη συγκεκριμένη μονάδα είναι απαραίτητη η εγκατάσταση μίας ιδιαιτέρως μεγάλης δυναμικότητας στήλης προσρόφησης CO<sub>2</sub>, λόγω της πολύ υψηλής ογκομετρικής παροχής του ρεύματος απαερίων που εισέρχεται σε αυτή. Για τον σχεδιασμό της στήλης χρησιμοποιήθηκε η εξίσωση Freundlich, η οποία έχει την εξής μορφή (Ρίζου et al., 2015):

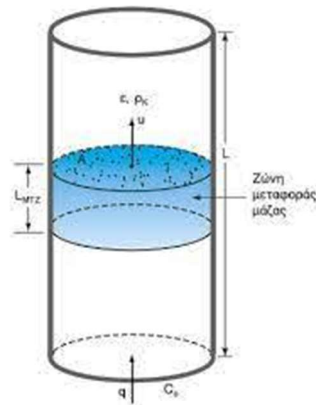
$$q = K \cdot C^{1/n} \quad [2.1]$$

Όπου:

q, C: οι συγκεντρώσεις του προσροφήματος στη στερεή και στην αέρια φάση, αντίστοιχα, μετά την επίτευξη της ισορροπίας (2,88 kg/m<sup>3</sup>) και (3,74 kg/m<sup>3</sup>).

K: παράμετρος που σχετίζεται με τη μέγιστη ποσότητα αερίου που μπορεί να προσροφηθεί στη στήλη (0,77, σταθερή).

n: εμπειρική αδιάστατη παράμετρος (1, σταθερή).



**Σχήμα 2.2.** Αρχή λειτουργίας της στήλης προσρόφησης.

### Εναλλάκτης Θερμότητας

Λόγω της εισαγωγής του ρεύματος αέρα σε θερμοκρασία περιβάλλοντος και της σημαντικά υψηλότερης ογκομετρικής παροχής του από το αντίστοιχο ρεύμα του CO<sub>2</sub>, οι απαιτήσεις για την ψύξη του αερίου ρεύματος πριν την είσοδο στον φωτό-βιοαντιδραστήρα είναι κατά κανόνα μικρές. Αποτέλεσμα είναι ο σχεδιασμός της συγκεκριμένης διεργασίας να πραγματοποιηθεί με την επιλογή ενός τυπικού εναλλάκτη θερμότητας διπλού σωλήνα μικρών διαστάσεων και δυναμικότητας (Σχήμα 2.3). Η εξίσωση η οποία χρησιμοποιήθηκε για τον σχεδιασμό του εναλλάκτη θερμότητας είναι (Jurandir et al., 2012):

$$Q = U \cdot A \cdot \Delta T_{\ln} \quad [2.2]$$

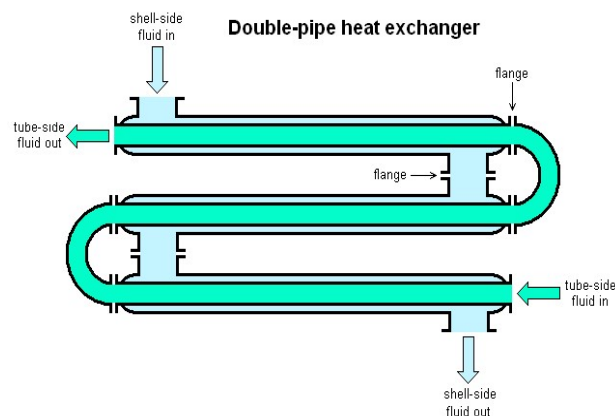
Όπου:

Q: η μεταφορά θερμότητας μεταξύ των δύο ρευστών (αερίων) (154,8 kW).

U: ο ολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας ( $0,2 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$ , σταθερή).

A: η απαιτούμενη επιφάνεια του εναλλάκτη θερμότητας (6,49 m<sup>2</sup>).

$\Delta T_{\ln}$ : η μέση λογαριθμική θερμοκρασιακή διαφορά των ρευμάτων (119 K).



**Σχήμα 2.3.** Σχεδιάγραμμα εναλλάκτη θερμότητας τύπου διπλού σωλήνα.

### Φωτό-Βιοαντιδραστήρας (PBR)

Στη συγκεκριμένη μονάδα χρησιμοποιείται ένας οριζόντιος σωληνωτός/αυλωτός (tubular) φωτό-βιοαντιδραστήρας κλειστού τύπου (PBR), κατασκευασμένος από πλαστικούς σωλήνες -με βασικό υλικό το χλωριούχο πολυβινύλιο (PVC)-, ο οποίος διαθέτει σύστημα ψύξης μέσω εξωτερικού ψεκασμού και διάταξη απαέρωσης των αερίων κατά την έξοδο (Σχήμα 2.4). Η συγκεκριμένη επιλογή έγινε λόγω των σημαντικών πλεονεκτημάτων του συγκεκριμένου τύπου φωτό-βιοαντιδραστήρων: (α) υψηλά επίπεδα καθαρότητας, (β) υψηλή απόδοση, (γ) υψηλή συγκέντρωση βιομάζας, (δ) ενεργειακά αποδοτική επεξεργασία, και (ε) εξοικονόμηση χώρου, λόγω της γεωμετρίας του (Industrial Plankton, 2020). Ο φωτό-βιοαντιδραστήρας θα βρίσκεται εγκατεστημένος σε ανοιχτό εξωτερικό χώρο, όπου θα εκτίθεται σε υψηλές τιμές ηλιακής ακτινοβολίας. Η Ελλάδα, ως μία χώρα με αρκετά υψηλά επίπεδα ηλιοφάνειας τις περισσότερες μέρες του χρόνου, είναι μία προσιτή επιλογή. Πιο συγκεκριμένα και εντελώς ενδεικτικά, τα Χανιά στην Κρήτη είναι αρκετά ιδανική τοποθεσία (3.000 ώρες ηλιοφάνειας ετησίως) με μέση ετήσια τιμή ηλιακής ακτινοβολίας 142 kWh/m<sup>2</sup> (T.O.T.E.E., 2010). Το σύστημα ψύξης θεωρείται απαραίτητο για τον αποδοτικό έλεγχο και τη ρύθμιση της θερμοκρασίας, κυρίως λόγω της σημαντικής αύξησης της κατά τους καλοκαιρινούς μήνες.

Για τον σχεδιασμό του φωτό-βιοαντιδραστήρα πραγματοποιήθηκε η αρχική παραδοχή ότι η αντίδραση παραγωγής βιομάζας και βιοχημικών συστατικών είναι «ψευδό» πρώτης τάξης. Λόγω της αυλωτής διαμόρφωσης του φωτό-βιοαντιδραστήρα, η βασική σχέση διαστασιολόγησης τους είναι:

$$V = F_{A0} \cdot \int_0^X \frac{dX}{-r_A} \quad [2.3]$$

Όπου:

V: ο λειτουργικός όγκος του φωτό-βιοαντιδραστήρα (12.649 m<sup>3</sup>).

F<sub>A0</sub>: η αρχική τροφοδοσία σε όρους μαζικής ροής (15.385 kg/day).

r<sub>A</sub>: η ταχύτητα της αντίδρασης-μετατροπής (0,97  $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3 \cdot \text{d}}$ ).

X: ο βαθμός απόδοσης/μετατροπής της αντίδρασης (0,8, σταθερή).

Σε συνδυασμό με την παραπάνω εξίσωση, για τον υπολογισμό του όγκου του φωτό-βιοαντιδραστήρα λαμβάνονται υπόψη και οι παρακάτω σχέσεις.

$$r_A = \mu_{s,\max} \cdot \frac{1}{1 + \left(\frac{C_A}{C_{cr}}\right)^m} \cdot C_A \quad [2.4]$$

$$F_A = Q \cdot C_A = F_{A0} \cdot (1 - X) \quad [2.5]$$

Όπου:

μ<sub>s,max</sub>: ο μέγιστος ειδικός ρυθμός ανάπτυξης των κυττάρων των μικροφυκών (0,35 day<sup>-1</sup>).

C<sub>A</sub>: η συγκέντρωση βιομάζας στον φωτό-βιοαντιδραστήρα (3 kg/m<sup>3</sup>, σταθερή).



- $C_{cr}$ : μία κρίσιμη ανώτατη τιμή της συγκέντρωσης βιομάζας, η οποία παρεμποδίζει την περαιτέρω ανάπτυξη των κυττάρων ( $5 \text{ kg/m}^3$ , σταθερή).
- $m$ : εμπειρική σταθερά της εξίσωσης ανάπτυξης των κυττάρων (5, σταθερή).
- $F_A$ : η παροχή του φωτό-βιοαντιδραστήρα σε όρους μαζικής ροής ( $3.076 \text{ kg/day}$ ).
- $Q$ : η ογκομετρική παροχή του φωτό-βιοαντιδραστήρα ( $374.358 \text{ m}^3/\text{day}$ ).



**Σχήμα 2.4.** Διάταξη σωληνοειδούς/αυλωτού φωτό-βιοαντιδραστήρα.

### **Δεξαμενή Καθίωσης**

Η δεξαμενή καθίωσης που χρησιμοποιείται στη συγκεκριμένη μονάδα είναι μία τυπική δεξαμενή καθίωσης ορθογωνικής διάταξης (Σχήμα 2.5). Περιλαμβάνει ένα ρεύμα εισόδου και δύο ρεύματα εξόδου, εκ των οποίων το ένα είναι καθαρό νερό και το άλλο η βιομάζα των μικροφυκών με την ποσότητα του υπολειπόμενου νερού. Η σχεδιαστική εξίσωση η οποία χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό της απαιτούμενης επιφάνειας της δεξαμενής είναι η εξής (Timmerhaus et al., 2002):

$$A = Q/V \quad [2.6]$$

Όπου:

- $A$ : η επιφάνεια της δεξαμενής καθίωσης ( $225 \text{ m}^2$ ).
- $Q$ : η ογκομετρική παροχή εισόδου της δεξαμενής ( $35.213 \text{ m}^3/\text{day}$ ).
- $V$ : η ταχύτητα καθίωσης της βιομάζας μικροφυκών ( $156 \text{ m/day}$ , σταθερή).



**Σχήμα 2.5.** Τυπική διάταξη μίας δεξαμενής καθίζησης.

### **Στήλη Διήθησης**

Για την περαιτέρω αφυδάτωση της βιομάζας χρησιμοποιείται μία στήλη διήθησης πλακών/πλαισίων κοινού χάλυβα (Σχήμα 2.6). Οι λόγοι που επιλέγεται η συγκεκριμένη συσκευή είναι τόσο οικονομικοί όσο και χωροταξικοί. Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάζει κατά κανόνα χαμηλό κόστος κεφαλαίου, πολύ καλή ξήρανση και μεγάλη συμπίεστικότητα του πλακούντα, ενώ απαιτεί σχετικά περιορισμένη επιφάνεια (Timmerhaus et al., 2002). Περιλαμβάνει επίσης ένα ρεύμα εισόδου και δύο ρεύματα εξόδου, από τα οποία το ένα είναι καθαρό νερό και το άλλο περιέχει τη βιομάζα μικροφυκών μαζί με την υπολειπόμενη ποσότητα νερού. Σε συνδυασμό με τη στήλη διήθησης είναι απαραίτητο να διαστασιοποιηθεί και ένας θερμαντήρας, ο οποίος θα λειτουργεί σαν μανδύας της διήθησης, προκειμένου να επιτευχθεί η επιθυμητή τιμή θερμοκρασίας. Ενώ ο σχεδιασμός του μανδύα διήθησης γίνεται ακριβώς όπως ο εναλλάκτης θερμότητας, η στήλη διήθησης υπολογίζεται με βάση την παρακάτω σχέση (Berg et al., 2009):

$$A = \frac{V}{J \cdot t} \quad [2.7]$$

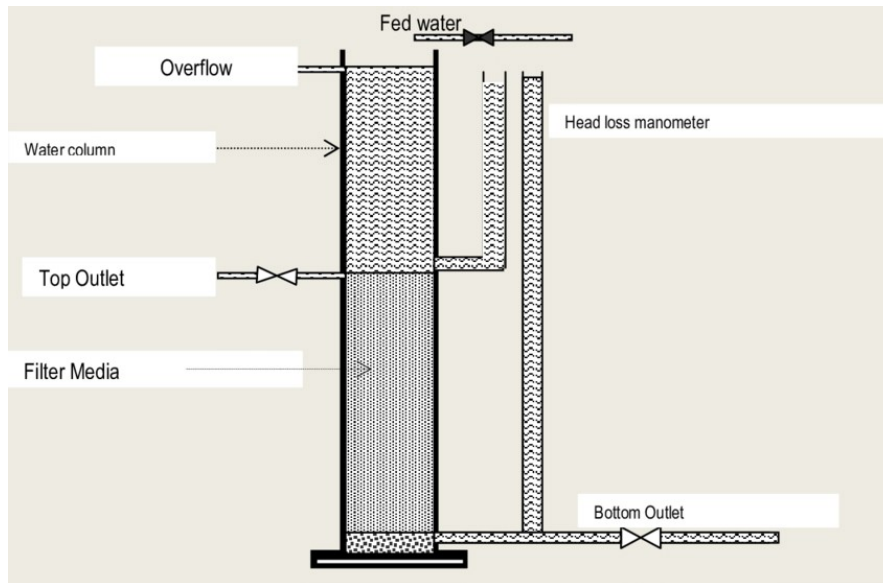
Όπου:

A: η επιφάνεια της στήλης διήθησης (2.126 m<sup>2</sup>).

V: ο λειτουργικός όγκος της στήλης διήθησης (244 m<sup>3</sup>).

J: η ταχύτητα διήθησης (16,6 m/day, σταθερή).

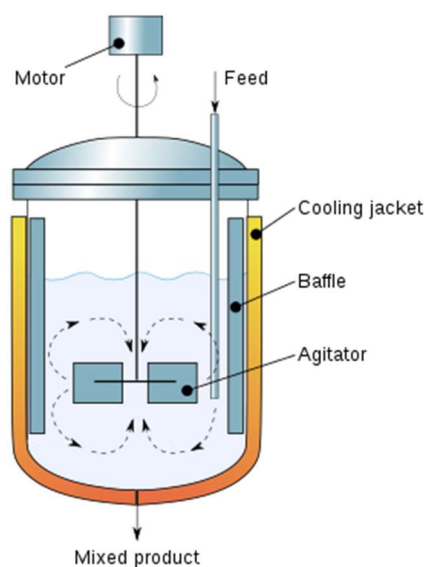
t: ο χρόνος παραμονής στη στήλη διήθησης (0,007 day, σταθερή).



**Σχήμα 2.6.** Αρχή λειτουργίας της στήλης διήθησης.

### Αντιδραστήρας Υδρόλυσης

Πρόκειται για έναν αντιδραστήρα συνεχούς λειτουργίας και πλήρους ανάμιξης (CSTR), στον οποίο πραγματοποιείται η αντίδραση υδρόλυσης των υδατανθράκων σε γλυκόζη (Σχήμα 2.7). Γενικά, η συγκεκριμένη αντίδραση ευνοείται θερμοδυναμικά υπό υψηλές θερμοκρασίες (Zhen et al., 2010). Για τη διαστασιολόγηση του αντιδραστήρα χρησιμοποιείται η βασική σχεδιαστική σχέση ενός CSTR, ο χρόνος παραμονής στο εσωτερικό του αντιδραστήρα (9,07 sec, σταθερή) και ένας κατάλληλος συντελεστής ασφαλείας, καταλήγοντας στην απλοποιημένη εξίσωση (Κούκος, 2010):



**Σχήμα 2.7.** Αντιδραστήρας συνεχούς λειτουργίας και πλήρους ανάμιξης (CSTR).

$$V = \Sigma. A \cdot V_{CAT} \quad [2.8]$$

Όπου:

V: ο όγκος του αντιδραστήρα (18,24 m<sup>3</sup>).

Σ.Α.: ο συντελεστής ασφαλείας (1,1, σταθερή).

V<sub>CAT</sub>: ο όγκος του καταλύτη της υδρόλυσης (16,58 m<sup>3</sup>).

### Φυγοκεντρικοί Διαχωριστές 1 και 2

Στην ολοκληρωμένη μονάδα εγκαθίστανται δύο φυγοκεντρικοί διαχωριστές απλού τύπου, οι οποίοι λειτουργούν σε υψηλές τιμές πίεσης (Σχήμα 2.8). Ενώ προσφέρουν σημαντικά μεγάλες αποδόσεις διαχωρισμού, παρουσιάζουν υψηλό κόστος κεφαλαίου και υψηλές απαιτήσεις ενέργειας (Timmerhaus et al., 2002). Στον πρώτο φυγοκεντρητή, το ρεύμα της βιομάζας που εισέρχεται διαχωρίζεται σε δύο ρεύματα: το πρώτο περιλαμβάνει τη γλυκόζη και το δεύτερο την υπολειπόμενη βιομάζα και τα συστατικά της. Στον δεύτερο φυγοκεντρητή, το ρεύμα της βιομάζας που εισέρχεται διαχωρίζεται επίσης σε δύο ρεύματα: το πρώτο περιλαμβάνει τις πρωτεΐνες και το δεύτερο την υπολειπόμενη βιομάζα και τα εναπομείναντα συστατικά της. Η διαστασιολόγηση των φυγοκεντρητών έγινε με βάση την ακόλουθη σχεδιαστική εξίσωση (Κούκος, 2010):

$$V = \frac{\tau \cdot F}{c_b} \quad [2.9]$$

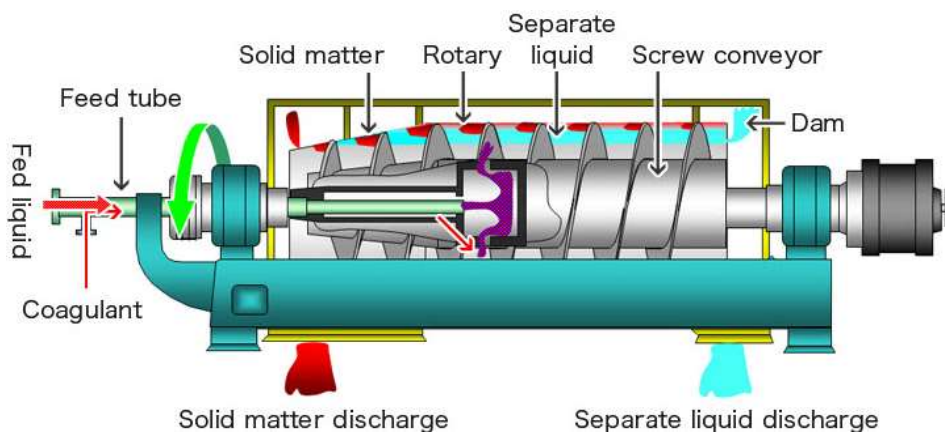
Όπου:

V: ο όγκος του φυγοκεντρικού διαχωριστή (αντίστοιχα, 62 m<sup>3</sup> και 22 m<sup>3</sup>).

τ: ο χρόνος παραμονής στο εσωτερικό της συσκευής (1.200 sec, σταθερή).

F: το ρεύμα τροφοδοσίας της συσκευής, σε όρους μαζικής ροής (αντίστοιχα, 0,56 tn/yr και 0,2 tn/yr).

c<sub>b</sub>: η συγκέντρωση της βιομάζας μικροφυκών (3 kg/m<sup>3</sup>, σταθερή).



Σχήμα 2.8. Αρχή λειτουργίας του φυγοκεντρικού διαχωριστή.

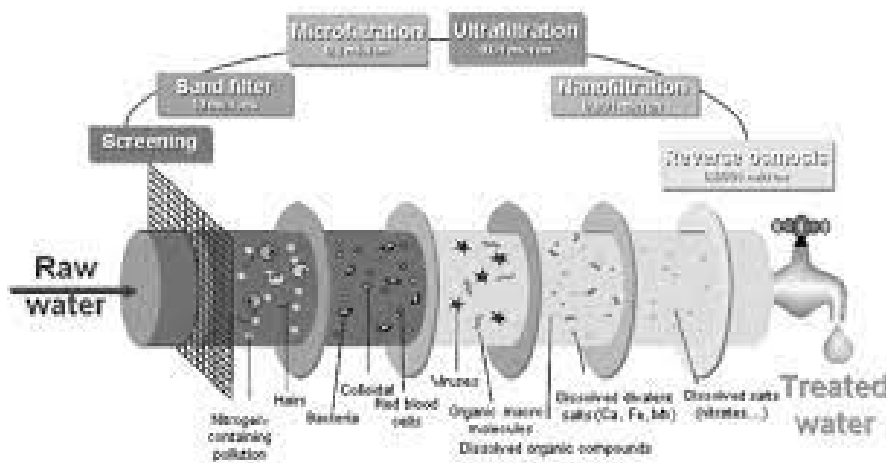
### Διήθηση Μεμβρανών

Πρόκειται για έναν τύπο διαχωριστή μεμβρανών πλακών και πλαισίων (Σχήμα 2.9). Κατά κανόνα, οι μεμβράνες παρουσιάζουν πολύ καλή αντίσταση στις επικαθίσεις και είναι εύκολες στον καθαρισμό, ωστόσο διακρίνονται από σχετικά υψηλό κόστος. Η συγκεκριμένη συσκευή χρησιμοποιείται στη μονάδα για τον διαχωρισμό της γλυκόζης από το νερό και το HCl. Η σχεδιαστική εξίσωση που χρησιμοποιήθηκε είναι η εξής (Doran et al., 2013):

$$A = \frac{0,27 \cdot V}{k \cdot t} \quad [2.10]$$

Όπου:

- A: η επιφάνεια των μεμβρανών (1.358 m<sup>2</sup>).
- V: ο όγκος της συσκευής διήθησης (62,8 m<sup>3</sup>).
- k: η ταχύτητα ροής του αιωρήματος (0,000034 m/sec, σταθερή).
- t: ο χρόνος παραμονής στη συσκευή διήθησης (3.600 sec, σταθερή).



Σχήμα 2.9. Αρχή λειτουργίας συσκευής διήθησης μεμβρανών.

### Διάρρηξη Κυττάρων

Ο στόχος της συγκεκριμένης διεργασίας είναι να υποβληθεί η βιομάζα -που έχει απομείνει μέχρι αυτό το στάδιο- σε επεξεργασία και ομογενοποίηση, με αποτέλεσμα τα στερεά σωματίδια της να διασπώνται υπό υψηλή πίεση και να διανέμονται σε όλο το προϊόν, μαζί με τα υγρά συστατικά, δημιουργώντας ένα περισσότερο ομοιογενές αιώρημα. Οι πιο ευρέως χρησιμοποιούμενοι ομογενοποιητές είναι υψηλής πίεσης και πολλαπλών εμβόλων και περιλαμβάνουν κατάλληλες βαλβίδες ομογενοποίησης και ένα κεντρικό πιστόνι/έμβολο στην κορυφή τους (Σχήμα 2.10). Η εξίσωση διαστασιολόγησης του ομογενοποιητή είναι η εξής (Phipps et al., 1985):

$$A = f \cdot \left(\frac{\Delta P}{\rho}\right)^{0,5} \quad [2.11]$$

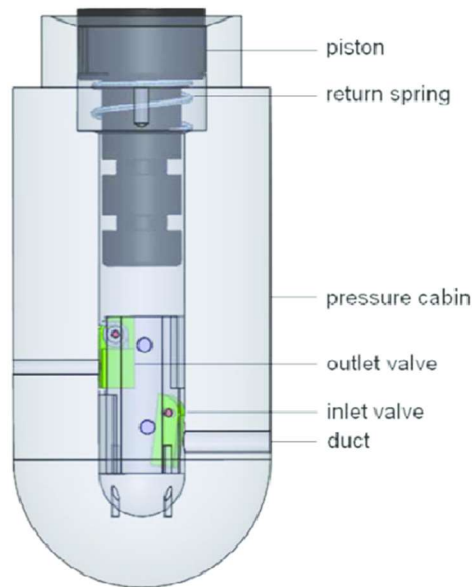
Όπου:

A: η επιφάνεια του πιστονιού/εμβόλου ( $1,15 \text{ m}^2$ ).

$\Delta P$ : η διαφορά πίεσης μεταξύ εξόδου και εισόδου της συσκευής ( $1.998.612 \text{ kg/m}^2$ ).

$\rho$ : η πυκνότητα του αιωρήματος ( $150 \text{ kg/m}^3$ , σταθερή).

f: το μήκος του πιστονιού/εμβόλου ( $0,1 \text{ m}$ , σταθερή).



**Σχήμα 2.10.** Ομογενοποιητής για τη διάρρηξη των κυττάρων και των μεμβρανών τους.

### Υπερδιήθηση

Πρόκειται για έναν τύπο διαχωριστή με διήθηση κεραμικών μεμβρανών (Σχήμα 2.11), ο οποίος χρησιμοποιείται ευρέως στις διεργασίες παραγωγής βιοενέργειας και βιοκαυσίμων, στην παραγωγή φαρμακευτικών προϊόντων και τροφίμων, στην επεξεργασία πόσιμου νερού και λυμάτων, στη βιομηχανία μετάλλων, επιστρώσεων και πλακιδίων, κ.α. (Ejaz et al., 2004). Στην πλειοψηφία των περιπτώσεων οι μεμβράνες αποτελούνται από οξείδια του αργιλίου (Al), του πυριτίου (Si), του τιτανίου (Ti) και του ζirkονίου (Zr). Σε αυτή τη διεργασία της υπό μελέτη μονάδας διαχωρίζονται οι πρωτεΐνες από το νερό. Η διαστασιολόγηση πραγματοποιείται με τη χρήση δύο εξισώσεων (Darcy et al., 2000, Mitra and Mitsides, 2016):

$$J = \frac{\text{TMP}}{R \cdot \mu} \quad [2.12]$$

Όπου:

J: ο ρυθμός ροής (ταχύτητα) μέσα από τη συσκευή υπερδιήθησης ( $567 \text{ m/day}$ ).

R: η συνολική αντίσταση κατά τη ροή του αιωρήματος ( $2,7 \cdot 10^{12} \text{ m}^{-1}$ ).

$\mu$ : το ιξώδες του αιωρήματος (0,00116 Pa·sec, σταθερή).

TMP: η διαμεμβρανική πίεση (20.580 kPa).

$$A = \frac{J}{\text{TMP} \cdot \text{KUF}} \quad [2.13]$$

Όπου:

A: η επιφάνεια των κεραμικών μεμβρανών (23,6 m<sup>2</sup>).

KUF: η διαπερατότητα των κεραμικών μεμβρανών (0,24 (kPa·m·day)<sup>-1</sup>, σταθερή).



**Σχήμα 2.11.** Σύστημα υπερδιήθησης κεραμικών μεμβρανών.

### **Δοχεία Εκχύλισης 1 και 2**

Και στις δύο περιπτώσεις διαχωρισμού θα χρησιμοποιηθούν φυγοκεντρικοί εκχυλιστήρες (Σχήμα 2.12). Αυτό συμβαίνει διότι καταλαμβάνουν γενικά μικρό όγκο και παρουσιάζουν μικρό χρόνο κατακράτησης, έχουν μικρές απαιτήσεις σε ποσότητα διαλύτη, ενώ έχουν τη δυνατότητα να λειτουργήσουν όταν η διαφορά πυκνότητας ανάμεσα στις δύο φάσεις εκχύλισης είναι μικρή (Timmerhaus et al., 2002). Όσον αφορά το 1<sup>ο</sup> δοχείο εκχύλισης, πρόκειται για μία στήλη εμπορικού τύπου RDC (περιστρεφόμενου δίσκου), λόγω της τιμής της διαμέτρου της. Στη 2<sup>η</sup> περίπτωση, πρόκειται για μία στήλη εμπορικού τύπου ARD (ασύμμετρης επαφής περιστρεφόμενου δίσκου), σύμφωνα με τη μέγιστη διάμετρο της στήλης. Η διαστασιολόγηση πραγματοποιείται με την χρήση των δύο παρακάτω εξισώσεων (Timmerhaus et al., 2002):

$$A_{\text{net}} = \frac{F}{3 \cdot \rho^{0,5}} \quad [2.14]$$

Όπου:

$A_{\text{net}}$ : το ύψος του δοχείου εκχύλισης (αντίστοιχα, 20,5 m και 13,9 m).

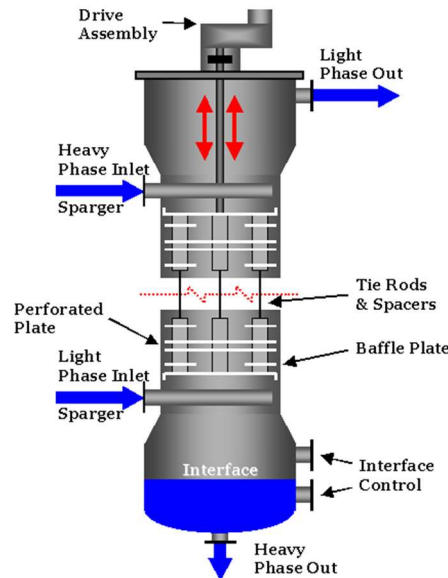
F: η μαζική ροή του ρεύματος τροφοδοσίας (αντίστοιχα, 1811 kg/day, 1.225 kg/day).

$\rho$ : η πυκνότητα της βιομάζας (861 kg/m<sup>3</sup>, σταθερή).

$$D = \left(4 \cdot A_{\text{net}} \cdot \frac{1}{0,88 \cdot \pi}\right)^{0,5} \quad [2.15]$$

Όπου :

D: η διάμετρος του δοχείου εκχύλισης (αντίστοιχα, 5,4 m και 4,4 m).



**Σχήμα 2.12.** Απεικόνιση της διάταξης του δοχείου εκχύλισης.

### Στήλες Απόσταξης 1 και 2

Και στις δύο περιπτώσεις διαχωρισμού μέσω απόσταξης θα χρησιμοποιηθούν στήλες με πληρωτικό υλικό, κατασκευασμένες από κοινό χάλυβα (Σχήμα 2.13). Το πληρωτικό υλικό μπορεί να είναι κάποιο από τα συνηθισμένα είδη που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία, π.χ., από πλαστικό. Επιπλέον, εκτός των στηλών θα διαστασιοποιηθούν και οι αναβραστήρες και συμπυκνωτές της κάθε μίας, ως απλοί εναλλάκτες θερμότητας. Για τη διαστασιολόγηση χρησιμοποιούνται και πάλι οι Εξισώσεις 2.14 και 2.15, πανομοιότυπα με τα δοχεία εκχύλισης. Οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται στην περίπτωση των αποστακτικών στηλών είναι:

$A_{\text{net}}$ : το ύψος της αποστακτικής στήλης (αντίστοιχα, 16,77 m και 2,49 m).

F: η μαζική ροή του ρεύματος τροφοδοσίας (αντίστοιχα, 1.476 kg/day και 219 kg/day).

$\rho$ : η πυκνότητα της βιομάζας (861 kg/m<sup>3</sup>, σταθερή).

D: η διάμετρος της αποστακτικής στήλης (αντίστοιχα, 4,9 m και 1,9 m).





**Σχήμα 2.13.** Διάταξη βιομηχανικών αποστακτικών στηλών.

## 2.4. Ισοζύγια Μάζας

Για τον αρχικό υπολογισμό των αναλυτικών ισοζυγίων μάζας του διαγράμματος ροής, χρησιμοποιείται για τη δυναμικότητα της μονάδας ως βάση υπολογισμών (κεντρική τιμή) η τιμή 1.000 tn/yr ή 3.076 kg/day (Σενάριο Ι). Η συγκεκριμένη δυναμικότητα αντιστοιχεί στη μαζική ροή της βιομάζας μικροφυκών που εξέρχεται από τον φωτό-βιοαντιδραστήρα (Ρεύμα [9] στο Σχήμα 2.1). Η επιλογή της δυναμικότητας στη συγκεκριμένη τιμή επεξηγείται αναλυτικά στο επόμενο κεφάλαιο της εργασίας.

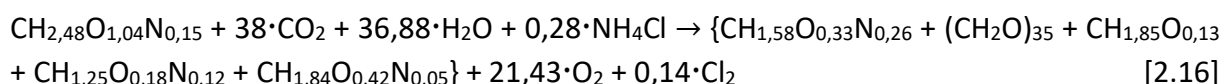
Στο αρχικό στάδιο της ολοκληρωμένης μονάδας εισέρχεται ως τροφοδοσία στη στήλη προσρόφησης το Ρεύμα [1] (1.009.790 kg/day), το οποίο περιλαμβάνει το CO<sub>2</sub>, μαζί με τα υπόλοιπα απαέρια καύσης που προέρχονται από τα καυσαέρια ενός σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας της Δ.Ε.Η. Η σύσταση του συγκεκριμένου ρεύματος παρουσιάζεται στον Πίνακα 2.2 (Δ.Ε.Η., 2021).

**Πίνακας 2.2.** Σύσταση απαερίων καύσης της μονάδας της Δ.Ε.Η.

| Συστατικό        | Σύσταση (% w/w) |
|------------------|-----------------|
| N <sub>2</sub>   | 73              |
| CO <sub>2</sub>  | 5               |
| H <sub>2</sub> O | 6               |
| Ar               | 1               |
| NO <sub>x</sub>  | 5               |
| O <sub>2</sub>   | 10              |

Από τη στήλη προσρόφησης εξέρχονται δύο ρεύματα, το Ρεύμα [2] (959.300 kg/day), που περιλαμβάνει όλα τα αέρια συστατικά του Ρεύματος [1] πλην του CO<sub>2</sub>, και το Ρεύμα [3] (50.489 kg/day) που περιλαμβάνει ολόκληρη την ποσότητα του CO<sub>2</sub>. Στη συνέχεια, το Ρεύμα [3] αναμιγνύεται με ένα ρεύμα αέρα 9 φορές μεγαλύτερο σε ογκομετρική παροχή (Ρεύμα [4], 454.405 kg/day). Έπειτα της ανάμιξης των δύο ρευμάτων, το νέο ρεύμα που περιέχει 10% αναλογία CO<sub>2</sub> σε αέρα εισέρχεται στον εναλλάκτη θερμότητας και εξέρχεται από αυτόν με σημαντικά μικρότερη θερμοκρασία (Ρεύμα [5], 504.895 kg/day).

Το Ρεύμα [5] αποτελεί την τροφοδοσία του φωτό-βιοαντιδραστήρα, μαζί με τα Ρεύματα [6] (556 kg/day), [8] (504.431 kg/day) και [11] (92.307 kg/day), τα οποία περιέχουν κατά αντιστοιχία την προκαλλιέργεια του στελέχους *Arthrospira* (υδατικό αιώρημα βιομάζας με αναλογία βιομάζα προς H<sub>2</sub>O 3/100), τα απαραίτητα θρεπτικά συστατικά σε υδατικό διάλυμα (για απλοποίηση, το συγκεκριμένο ρεύμα προσομοιώνεται ως ένα απλό υδατικό ρεύμα χλωριούχου αμμωνίου -NH<sub>4</sub>Cl- συγκέντρωσης 0,3 g/l) και την ανακύκλωση του νερού από τα επόμενα στάδια της μονάδας (καθίζηση και διήθηση). Από τον φωτό-βιοαντιδραστήρα εξέρχονται τα Ρεύματα [7] (110.124 kg/day) και [9] (105.641 kg/day), τα οποία περιλαμβάνουν τα αέρια συστατικά της εξόδου (μίγμα N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> και CO<sub>2</sub>) και το υδατικό αιώρημα της βιομάζας που παράγεται, αντίστοιχα. Οι αναλυτικοί υπολογισμοί των ποσοτήτων CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, O<sub>2</sub> και NH<sub>4</sub>Cl γίνονται με τη χρήση της παρακάτω χημικής αντίδρασης:



Τα συστατικά και οι μοριακοί τύποι της παραπάνω αντίδρασης που αφορούν τα συστατικά της βιομάζας μικροφυκών αναλύονται στον Πίνακα 2.3. Επίσης, στα προϊόντα της αντίδρασης, εντός των αγκυλών αναπαρίσταται η συνολική παραγόμενη βιομάζα, κατανεμημένη στα τέσσερα βιοχημικά προϊόντα ενδιαφέροντος, συγκεκριμένα πρωτεΐνες, υδατάνθρακες, λιπίδια και φυκοκυανίνη, αλλά και στην υπολειπόμενη βιομάζα.

**Πίνακας 2.3.** Μοριακοί τύποι των συστατικών της βιομάζας μικροφυκών (Hoseini et al., 2013, Chagas et al., 2016).

| Βιοχημικό Συστατικό  | Μοριακός Τύπος   |
|----------------------|--|
| Βιομάζα              | CH <sub>2,48</sub> O <sub>1,04</sub> N <sub>0,15</sub> |
| Πρωτεΐνες            | CH <sub>1,58</sub> O <sub>0,33</sub> N <sub>0,26</sub> |
| Υδατάνθρακες         | (CH <sub>2</sub> O) <sub>35</sub>                      |
| Λιπίδια              | CH <sub>1,85</sub> O <sub>0,13</sub>                   |
| Φυκοκυανίνη          | CH <sub>1,25</sub> O <sub>0,18</sub> N <sub>0,12</sub> |
| Υπολειπόμενη βιομάζα | CH <sub>1,84</sub> O <sub>0,42</sub> N <sub>0,05</sub> |

Επιπρόσθετα, οι ποσότητες των στοιχείων στο ρεύμα της βιομάζας υπολογίστηκαν με βάση κάποιες εμπειρικές παραμέτρους της σύστασης της παραγόμενης βιομάζας, από το συγκεκριμένο στέλεχος μικροφυκών (Saleh et al., 2012). Η τελική σύσταση που υιοθετήθηκε στη συγκεκριμένη εργασία μπορεί να φανεί στον Πίνακα 2.4.

**Πίνακας 2.4.** Σύσταση βιομάζας μικροφυκών του στελέχους *Arthrospira*.

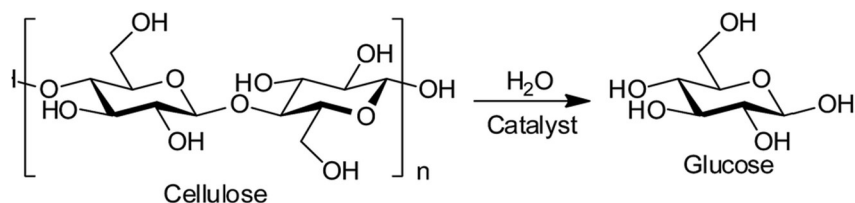
| Βιοχημικό Συστατικό  | Σύσταση (% w/w) |
|----------------------|-----------------|
| Πρωτεΐνες            | 50              |
| Υδατάνθρακες         | 15              |
| Λιπίδια              | 15              |
| Φυκοκυανίνη          | 4               |
| Υπολειπόμενη βιομάζα | 16              |

Θα πρέπει να σημειωθεί πως η ποσότητα του νερού στο Ρεύμα [9] (102.564 kg/day) υπολογίστηκε βάσει της δυναμικότητας της συνολικής βιομάζας και της συγκέντρωσης της βιομάζας, η οποία λήφθηκε ίση με 3 g/l. Έπειτα, το Ρεύμα [9] εισέρχεται στη δεξαμενή καθίζησης και ουσιαστικά κατανέμεται στα Ρεύματα [10] και [11α]. Το Ρεύμα [11α] περιλαμβάνει το 40% της ποσότητας του νερού που απομακρύνεται συνολικά από τα στάδια καθίζησης και διήθησης. Το Ρεύμα [10] (68.718 kg/day) περιλαμβάνει τη βιομάζα μικροφυκών πλην αυτής της ποσότητας νερού.

Στη συνέχεια, το Ρεύμα [10] εισέρχεται στη στήλη διήθησης, από την οποία εξέρχονται το Ρεύμα [11β] και το Ρεύμα [12] (13.333 kg/day). Το Ρεύμα [11β] περιλαμβάνει το υπόλοιπο 60% της συνολικής ποσότητας του νερού που απομακρύνεται από τα τελευταία δύο στάδια. Αυτή η ποσότητα ανέρχεται στο 90% της ποσότητας του νερού που εξέρχεται από τον φωτό-βιοαντιδραστήρα και επανέρχεται σε αυτόν μέσω της ανακύκλωσης (Ρεύμα [11], 92.307 kg/day). Το Ρεύμα [12], το οποίο περιλαμβάνει τη βιομάζα μικροφυκών πλην της ποσότητας νερού που απομακρύνθηκε, τροφοδοτείται στον αντιδραστήρα υδρόλυσης, μαζί με το Ρεύμα [13] (230 kg/day), το οποίο περιέχει το διάλυμα HCl. Μέσα στον αντιδραστήρα λαμβάνει χώρα η αντίδραση μετατροπής των υδατανθράκων (συμβολίζονται στο Σχήμα 2.14 ως πρότυπη κυτταρίνη) σε γλυκόζη.

Συνεπώς, το Ρεύμα [14] (13.564 kg/day) που εξέρχεται από τον αντιδραστήρα υδρόλυσης περιλαμβάνει τη βιομάζα των μικροφυκών, με μοναδική διαφοροποίηση τη μετατροπή των υδατανθράκων σε γλυκόζη. Έπειτα, το Ρεύμα [14] εισέρχεται στον φυγοκεντρικό διαχωριστή 1. Από αυτόν εξέρχονται τα Ρεύματα [15] (8.604 kg/day) και [18] (4.906 kg/day). Το Ρεύμα [15] περιλαμβάνει τη γλυκόζη μαζί με μικρές ποσότητες HCl και νερού. Το Ρεύμα [18] περιλαμβάνει τα υπόλοιπα συστατικά του Ρεύματος [14] πλην της γλυκόζης. Το Ρεύμα [15] εισέρχεται στη διάταξη διήθησης μεμβρανών για να διασπαστεί στα Ρεύματα [16] και

[17]. Το Ρεύμα [16] (8.389 kg/day) περιλαμβάνει το HCl και το νερό που επιστρέφουν στον αντιδραστήρα υδρόλυσης μέσω της ανακύκλωσης. Το Ρεύμα [17] (214 kg/day) περιλαμβάνει τη γλυκόζη, η οποία είναι το πρώτο προϊόν της μονάδας παραγωγής.



**Σχήμα 2.14.** Αντίδραση παραγωγής γλυκόζης από την υδρόλυση υδατανθράκων.

Παράλληλα, το Ρεύμα [18], το οποίο εξέρχεται από τον φυγοκεντρητή 1 εισέρχεται στον ομογενοποιητή, όπου λαμβάνει χώρα η διάρρηξη των κυτταρικών μεμβρανών υπό υψηλή πίεση. Από τον ομογενοποιητή εξέρχεται το Ρεύμα [19] (4.906 kg/day), το οποίο περιλαμβάνει τα ίδια βιοχημικά συστατικά με το ρεύμα εισόδου, αλλά πλέον απελευθερωμένα στο αιώρημα. Στο επόμενο βήμα, το Ρεύμα [19] εισέρχεται στον φυγοκεντρητή 2. Από αυτόν εξέρχονται τα Ρεύματα [20] (2.908 kg/day) και [23] (1.690 kg/day), τα οποία περιλαμβάνουν αντίστοιχα τις πρωτεΐνες, μαζί με μία ποσότητα HCl και νερού, και τα υπόλοιπα συστατικά της βιομάζας πλην τις πρωτεΐνες. Για τον διαχωρισμό των πρωτεϊνών, το Ρεύμα [20] εισέρχεται στη στήλη υπερδιήθησης, από όπου εκκινούν τα Ρεύματα [21] και [22]. Το Ρεύμα [21] (1.702 kg/day) περιλαμβάνει το νερό και το HCl, ενώ το Ρεύμα [22] (1.169 kg/day) περιέχει τις πρωτεΐνες, ως το δεύτερο προϊόν της υπό μελέτη μονάδας παραγωγής.

Από την άλλη πλευρά, το Ρεύμα [23] τροφοδοτείται στη στήλη εκχύλισης 1 μαζί με το μίγμα διαλυτών MeOH/CH<sub>3</sub>Cl σε αναλογία 2/1 (Ρεύμα [24], 122 kg/day). Η έξοδος της διεργασίας της εκχύλισης περιλαμβάνει το ρεύμα του μίγματος διαλυτών με τα λιπίδια (Ρεύμα [25], 1.476 kg/day) και το ρεύμα φυκοκυανίνης, υπολείμματος και νερού (Ρεύμα [28], 1.219 kg/day). Στο επόμενο στάδιο, το Ρεύμα [25] εισέρχεται στη στήλη απόσταξης 1, από τη οποία εξέρχονται το Ρεύμα [26] (369 kg/day) που περιλαμβάνει τα λιπίδια, ως το τρίτο προϊόν της μονάδας παραγωγής, και το Ρεύμα [27] (985 kg/day) που αποτελείται από το μίγμα διαλυτών και επιστρέφει στη στήλη εκχύλισης 1 μέσω ανακύκλωσης.

Τέλος, το Ρεύμα [28] οδηγείται προς τη στήλη εκχύλισης 2 μαζί με το Ρεύμα [29] (5,6 kg/day), το οποίο περιλαμβάνει το εξάνιο ως διαλύτη. Στην έξοδο της στήλης, το Ρεύμα [30] (1.096 kg/day) περιλαμβάνει το υπόλειμμα και το νερό, ενώ στο Ρεύμα [31] (219 kg/day) περιέχονται η φυκοκυανίνη και το εξάνιο. Για τον διαχωρισμό της φυκοκυανίνης, το Ρεύμα [31] τροφοδοτείται στη στήλη απόσταξης 2, από όπου εξέρχονται το Ρεύμα [32] (108 kg/day) που περιέχει το εξάνιο προς ανακύκλωση και το Ρεύμα [33] (105 kg/day) που περιλαμβάνει τη φυκοκυανίνη, ως το τέταρτο προϊόν της μονάδας παραγωγής.

Όλες οι τιμές των σημαντικότερων παραμέτρων για τις διεργασίες που περιεγράφηκαν προηγουμένως παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.5 (Xiaojia et al., 2017, Marques et al., 2017), Hadiyanto et al., 2015, Chang et al., 2013).

**Πίνακας 2.5.** Τιμές παραμέτρων και αποδόσεων των σημαντικότερων διεργασιών.

| Παράμετρος                             | Τιμή (%)  |
|--|-----------|
| Βαθμός μετατροπής αντίδρασης υδρόλυσης | 58        |
| Συντελεστής ανακύκλωσης νερού          | 90        |
| Απόδοση φυγοκεντρικών διαχωριστών      | 80        |
| Απόδοση υπερδιήθησης                   | 95        |
| Απόδοση δοχείων εκχύλισης 1 και 2      | 80 και 86 |
| Απόδοση στηλών απόσταξης 1 και 2       | 89 και 95 |

## 2.5. Ισοζύγια Ενέργειας

Όπως ακριβώς τα ισοζύγια μάζας, και τα ισοζύγια ενέργειας είναι ιδιαίτερα σημαντικά στη συγκεκριμένη μονάδα, διότι κάποιες από τις διεργασίες λειτουργούν σε διαφορετικά εύρη θερμοκρασιών, με αποτέλεσμα να είναι απαραίτητη η δαπάνη ενέργειας προκειμένου να επιτευχθούν οι επιθυμητές τιμές. Κατά ακριβή αναλογία με τα προηγούμενα, για τον αρχικό υπολογισμό των αναλυτικών ισοζυγίων ενέργειας χρησιμοποιείται για τη δυναμικότητα της μονάδας η επιλεγμένη κεντρική τιμή -Σενάριο I- 1.000 tn/yr (3.076 kg/day).

Η πρώτη διεργασία στην οποία πραγματοποιείται μεταφορά θερμότητας είναι ο εναλλάκτης θερμότητας, ο οποίος λειτουργεί ως ψύκτης του αερίου ρεύματος τροφοδοσίας (καθήκον ψύξης 154 kW). Το Ρεύμα [3] εισέρχεται στον ψύκτη σε θερμοκρασία 450 °C, μαζί με το Ρεύμα [4], το οποίο εισέρχεται σε θερμοκρασία 25 °C. Το Ρεύμα [5], το οποίο εξέρχεται από τον ψύκτη, διατηρεί μία θερμοκρασία περίπου στους 25 °C. Προκειμένου να επιτευχθεί αυτή η πτώση της θερμοκρασίας θα χρησιμοποιηθεί διαθέσιμο ψυκτικό νερό που εισέρχεται στους 15 °C.

Όσον αφορά τον κλειστό φωτό-βιοαντιδραστήρα, για την ψύξη του θα χρειαστεί να ενσωματωθεί ένα σύστημα ψεκασμού νερού (καθήκον ψύξης 194 kW) -κατά προτίμηση θαλασσινού για να μειωθεί το κόστος-, προκειμένου να διατηρηθεί η θερμοκρασία του σταθερή (ακόμη και τους καλοκαιρινούς μήνες), όταν ξεπερνάει την πρότυπη θερμοκρασία περιβάλλοντος (25 °C).

Η ενεργειακή ανάλυση της στήλης διήθησης (καθήκον θέρμανσης 95.081 kW) έδειξε πως προκειμένου να λειτουργήσει στη μέγιστη απόδοση της θα χρειαστεί να επιτευχθεί άνοδος της θερμοκρασίας του ρεύματος εισόδου από τους 25 °C στους 200 °C. Στη στήλη ενσωματώθηκε ένας μανδύας διήθησης, ο οποίος έχει τον ρόλο του θερμαντήρα.

Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκε διαθέσιμος στη μονάδα υπέρθερμος ατμός ώστε να επιτευχθεί η κατάλληλη άνοδος της θερμοκρασίας.

Στην πορεία της μονάδας, οι θερμοκρασίες παραμένουν σχετικά σταθερές από διεργασία σε διεργασία, έως την είσοδο της πρώτης αποστακτικής στήλης. Η συγκεκριμένη στήλη αποτελείται από έναν αναβραστήρα, ο οποίος είναι υπεύθυνος για την άνοδο της θερμοκρασίας του Ρεύματος [27], και από έναν συμπυκνωτή, ο οποίος είναι υπεύθυνος για την ψύξη του Ρεύματος [26] και την έξοδο του στην κατάλληλη θερμοκρασία. Αναλυτικότερα, ο αναβραστήρας (καθήκον θέρμανσης 1.571 kW) δημιουργεί άνοδο της θερμοκρασίας από τους 55 °C στους 100 °C με τη βοήθεια ατμού θέρμανσης. Από την άλλη πλευρά, ο συμπυκνωτής (καθήκον ψύξης 1.571 kW) προκαλεί κάθοδο της θερμοκρασίας από τους 100 °C στους 55 °C με τη χρήση νερού ψύξης.

Εντελώς αντίστοιχα, η δεύτερη αποστακτική στήλη αποτελείται από έναν αναβραστήρα για την άνοδο της θερμοκρασίας του Ρεύματος [32] και από έναν συμπυκνωτή για τη μείωση της θερμοκρασίας του Ρεύματος [33]. Συγκεκριμένα, ο αναβραστήρα (καθήκον θέρμανσης 224 kW) λειτουργεί για την αύξηση της θερμοκρασίας από τους 55 °C στους 100 °C, με τη χρήση και πάλι ατμού θέρμανσης. Ο συμπυκνωτής (με καθήκον ψύξης 224 kW) λειτουργεί για τη μείωση της θερμοκρασίας από τους 100 °C στους 55 °C με τη βοήθεια νερού ψύξης.

## Κεφάλαιο 3:

# Οικονομική Ανάλυση και Μελέτη Βιωσιμότητας

### 3.1. Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Παρόλο που τα μικροφύκη είναι εδώ και χρόνια μία πολλά υποσχόμενη πρώτη ύλη βιολογικής προέλευσης, η οικονομική βιωσιμότητα των τεχνολογιών αξιοποίησης της σε βιομηχανική κλίμακα είναι ακόμα υπό αμφισβήτηση. Για να επιτευχθεί μείωση του σχετικού κόστους, θα πρέπει να αναπτυχθούν απλοποιημένες αλλά βέλτιστες διεργασίες για τις κύριες λειτουργίες της μονάδας, όπως η καλλιέργεια, η συγκομιδή, η διάρρηση, η εκχύλιση, κλπ. (Wiffels, 2010). Επιπρόσθετα, ανάλογα με τα διυλιστήρια πετροχημικών, είναι απαραίτητο να εφαρμοστεί πλήρης κλασματοποίηση και αξιοποίηση της βιομάζας μικροφυκών, οδηγώντας σε ένα βιοδιυλιστήριο (3<sup>ης</sup> γενιάς) πολλαπλών προϊόντων (Lam et al., 2017). Ωστόσο, αυτή η έννοια είναι ακόμα σε αρκετά πρώιμο ερευνητικό στάδιο (Vanthoor-Koormans et al., 2013).

Επί του παρόντος, οι περισσότερες εφαρμογές βιομάζας μικροφυκών αφορούν τρόφιμα, ζωοτροφές και εφαρμογές υψηλής αξίας (Vandermeulen et al., 2012, Viganì et al., 2015). Σε μία επισκόπηση διαφορετικών σεναρίων αγοράς (Ruiz et al. 2016), πραγματοποιήθηκε εκτίμηση του κόστους για την καλλιέργεια και τη συγκομιδή των μικροφυκών στο εύρος 3,2-11 €/kg βιομάζας (σε σύστημα καλλιέργειας 100 εκταρίων). Επιπλέον, τα κόστη επεξεργασίας της βιομάζας σε ένα βιοδιυλιστήριο 3<sup>ης</sup> γενιάς υπολογίστηκαν μεταξύ 2,3-4,3 €/kg. Συγκεκριμένα για τα βιοκαύσιμα (βιοντίζελ), οι εκτιμήσεις κόστους κυμαίνονται από 0,55 έως 9 €/lt, εύρος που αντιστοιχεί σε 1,65-27 €/kg βιομάζας μικροφυκών (Quinn and Davis, 2015). Αντίθετα, η παραγωγή βιοχημικών υψηλής αξίας δείχνει πιο ευνοϊκή οικονομικά. Ενδεικτικά, τα κόστη παραγωγής ω-3 λιπαρών οξέων και χρωστικών (π.χ., φυκοκυανίνης) κυμαίνονται μεταξύ 2,35-8,1 €/kg και 12,5-108 €/kg, αντίστοιχα, ανάλογα με το σύστημα παραγωγής, τις τεχνολογίες επεξεργασίας, τη σύσταση της βιομάζας και την τοποθεσία της μονάδας (Chauton et al., 2015, Thomassen et al., 2016).

Στην πλειοψηφία των απλών αλυσίδων αξίας που βασίζονται στα μικροφύκη, το κόστος καλλιέργειας μικροφυκών έχει τη μεγαλύτερη συνεισφορά στο συνολικό κόστος παραγωγής (4,5-7,5 €/kg). Συνεπώς, όλες αυτές οι αλυσίδες θα επωφεληθούν από τη βελτιστοποίηση του συγκεκριμένου σταδίου ως προς το χαμηλότερο κόστος καλλιέργειας (Laurens et al., 2017). Αντίθετα, στην περίπτωση ενός πλήρους βιοδιυλιστηρίου 3<sup>ης</sup> γενιάς το κόστος επεξεργασίας της βιομάζας και ανάκτησης των πολλαπλών προϊόντων μπορεί να είναι εξίσου υψηλό ή ακόμη και υψηλότερο (6-8 €/kg) (Ruiz et al, 2016). Ενδεικτικά, σε ένα σύστημα παραγωγής 100 εκταρίων υπολογίστηκε ότι τόσο το κόστος καλλιέργειας σε ένα κλειστό σωληνωτό PBR, όσο και το κόστος της μετέπειτα επεξεργασίας της βιομάζας θα

είναι προσεγγιστικά 3 €/kg. Συνεπώς, και τα δύο συγκεκριμένα στάδια του βιοδιυλιστηρίου συνεισφέρουν κατά 50% στο συνολικό κόστος (Chauton et al., 2015). Τα έξοδα της μεταγενέστερης επεξεργασίας περιλαμβάνουν όχι μόνο τον εξοπλισμό, αλλά και τις λειτουργικές δαπάνες όπως το κόστος ενέργειας και των βοηθητικών παροχών. Σε άλλη περίπτωση, βρέθηκε ότι ο διαχωρισμός των ω-3 λιπαρών οξέων από τη βιομάζα μικροφυκών αντιστοιχεί σε περισσότερο από 50-60% του συνολικού κόστους της διεργασίας (Grima et al., 2003). Αυτό συμβαίνει καθώς οι ειδικές διεργασίες ανάκτησης των βιοχημικών συστατικών της βιομάζας απαιτούν περισσότερες λειτουργικές μονάδες.

Επικεντρώνοντας το ενδιαφέρον σε συγκεκριμένα προϊόντα μικροφυκών, το σενάριο παραγωγής πρωτεϊνών (συμπεριλαμβανομένου του υπολείμματος ως συν-προϊόν) οδηγεί σε δυσμενείς οικονομικούς δείκτες (κόστος παραγωγής 2,99 €/kg) (Asiedu et al., 2018). Στην περίπτωση του βιοντίζελ μπορεί να βρεθεί μία πολύ μεγάλη απόκλιση στο κόστος παραγωγής (0,27-9,7 €/kg), λόγω κυρίως της επιλογής της τεχνολογίας καλλιέργειας (ανοιχτά έναντι κλειστών συστημάτων καλλιέργειας) και της περιεκτικότητας λιπιδίων στη βιομάζα (Quinn and Davis, 2015). Τέλος, στην περίπτωση των χρωστικών ουσιών υπάρχει και πάλι ένα μεγάλο εύρος τιμών στο κόστος παραγωγής (13,75-31,25 €/kg). Από τα άλλη πλευρά, τα συγκεκριμένα προϊόντα έχουν γενικά μία μικρή αγορά με σημαντικά υψηλότερες τιμές πώλησης, γεγονός που μπορεί να ευνοήσει την οικονομικότητα της εκάστοτε μονάδας (Thomassen et al., 2016).

### 3.2. Ανάλυση Παγίου Κόστους

Η οικονομική ανάλυση της ολοκληρωμένης μονάδας παραγωγής θα στηριχθεί αρχικά στον προσδιορισμό του παγίου κόστους, με βάση τα δεδομένα που έχουν υπολογιστεί στο προηγούμενο κεφάλαιο για το Σενάριο Ι. Συγκεκριμένα, ο υπολογισμός του παγίου κόστους κεφαλαίου (FCI) ορίζεται ως το άθροισμα του άμεσου κόστους (DC) και του έμμεσου κόστους (IC). Το άμεσο κόστος περιλαμβάνει συνοπτικά τα κόστη προμήθειας και εγκατάστασης εξοπλισμού, αυτόματου ελέγχου και οργάνων, σωληνώσεων, ηλεκτρολογικού εξοπλισμού, κτιρίων, βελτίωσης οικοπέδου και εγκατάστασης βοηθητικών παροχών. Από την άλλη πλευρά, το έμμεσο κόστος αποτελείται από τα κόστη μελέτης και επίβλεψης, τα έξοδα ανεγέρσεως και αμοιβής εργολάβου και τα απρόβλεπτα κόστη (Walas et al., 2010). Πιο αναλυτικά, η σημαντικότερη παράμετρος προκειμένου να υπολογιστεί το πάγιο κόστος κεφαλαίου είναι το συνολικό κόστος προμήθειας του εξοπλισμού. Ο προσδιορισμός αυτού θα επιτευχθεί υπολογίζοντας ξεχωριστά το κόστος προμήθειας κάθε συσκευής, με βάση κατάλληλες εξισώσεις και διαγράμματα κοστολόγησης.

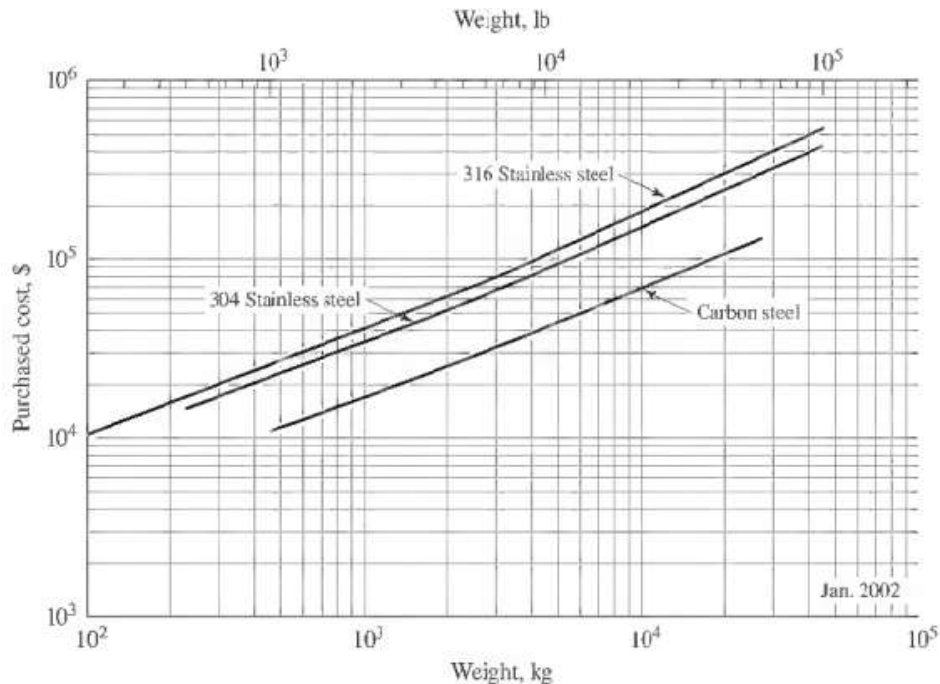
#### Στήλη Προσρόφησης

Ο υπολογισμός του παγίου κόστους προμήθειας της στήλης προσρόφησης γίνεται μέσω του Σχήματος 3.1 (Timmerhaus et al., 2002). Αξιοποιώντας την τιμή της μαζικής ροής στη στήλη (1.009.790 kg/day) και την τιμή του επιλεγμένου χρόνου παραμονής (0,17 days)



υπολογίζεται το βάρος της στήλης προσρόφησης (62.500 kg). Επιλέγοντας ως υλικό κατασκευής τον κοινό χάλυβα, ο υπολογισμός του κόστους αγοράς πραγματοποιείται αξιοποιώντας τη χαμηλότερη ευθεία του διαγράμματος. Έτσι, το τελικό κόστος προμήθειας της στήλης προσρόφησης προκύπτει:

$$C_{e1} = 246.000 \text{ €} \quad [3.1]$$



**Σχήμα 3.1.** Διάγραμμα κόστους προμήθειας της στήλης προσρόφησης.

### Εναλλάκτης Θερμότητας

Ο προσδιορισμός του παγίου κόστους αγοράς του εναλλάκτη θερμότητας στηρίζεται στον Πίνακα 3.1 (Dysert et al., 2007, Woodward and Chen, 2007). Έχοντας υπολογίσει την απαιτούμενη επιφάνεια του εναλλάκτη (6,48 m<sup>2</sup>) είναι δυνατό να επιλεγθεί η κατάλληλη κατηγορία εναλλάκτη θερμότητας -στη συγκεκριμένη περίπτωση επιλέγεται ο εναλλάκτης τύπου διπλού σωλήνα- και κατά συνέπεια να προκύψουν οι σχετικές παράμετροι και σταθερές. Με αυτόν τον τρόπο, χρησιμοποιώντας τις τιμές των μεταβλητών  $a = 500$ ,  $b = 1.100$  και  $n = 1$ , προσδιορίζεται το κόστος προμήθειας του εναλλάκτη βάσει της εξίσωσης:

$$C_{e2} = a + b \cdot S^n = 2.374 \text{ €} \quad [3.2]$$

### Φωτό-Βιοαντιδραστήρας

Ο άμεσος υπολογισμός του παγίου κόστους κεφαλαίου του φωτό-βιοαντιδραστήρα πραγματοποιείται πολλαπλασιάζοντας τον συνολικό λειτουργικό όγκο του (12.649 m<sup>3</sup>) με την ευρέως διαθέσιμη τιμή των 123 (€/m<sup>3</sup>) για πλαστικούς σωληνωτούς αυλωτούς φωτό-

βιοαντιδραστήρες κλειστού τύπου -υλικό κατασκευής το PVC- (Clippinger et al., 2019). Προσθέτοντας και το πάγιο κόστος του συστήματος ψύξης (4.303 €), το οποίο υπολογίζεται με τον ίδιο ακριβώς τρόπο που κοστολογήθηκε ο εναλλάκτης θερμότητας, προκύπτει πως το τελικό κόστος προμήθειας του φωτό-βιοαντιδραστήρα είναι:

$$C_{e3} = 1.560.200 \text{ €} \quad [3.3]$$

**Πίνακας 3.1.** Κόστος αγοράς εναλλακτών θερμότητας για κοινό εξοπλισμό εγκαταστάσεων.

| Είδος Εναλλάκτη Θερμότητας | Μονάδες για το Μέγεθος S  | S <sub>Μικρότερο</sub> | S <sub>Μεγαλύτερο</sub> | a      | b     | n   |
|----------------------------|---------------------------|------------------------|-------------------------|--------|-------|-----|
| Κελύφους και σωλήνα        | Επιφάνεια, m <sup>2</sup> | 10                     | 1.000                   | 10.000 | 88    | 1   |
| Πλωτής κεφαλής             | Επιφάνεια, m <sup>2</sup> | 10                     | 1.000                   | 11.000 | 115   | 1   |
| Διπλού σωλήνα              | Επιφάνεια, m <sup>2</sup> | 1                      | 80                      | 500    | 1.100 | 1   |
| Θερμοσίφωνα                | Επιφάνεια, m <sup>2</sup> | 10                     | 500                     | 13.000 | 95    | 1   |
| Βραστήρας                  | Επιφάνεια, m <sup>2</sup> | 10                     | 500                     | 14.000 | 83    | 1   |
| Πλακών και πλαισίων        | Επιφάνεια, m <sup>2</sup> | 1                      | 180                     | 1.100  | 850   | 0,4 |

### Δεξαμενή Καθίζησης

Ο υπολογισμός του παγίου κόστους κεφαλαίου της δεξαμενής καθίζησης γίνεται με τη βοήθεια του Πίνακα 3.2. Καθώς κατά τη διαστασιολόγηση έχει υπολογιστεί ο όγκος της δεξαμενής καθίζησης (2.567 m<sup>3</sup>) μπορεί να επιλεγθεί το ιδανικό είδος δεξαμενής (πλωτής οροφής), καθώς και οι συμπληρωματικές παράμετροι. Χρησιμοποιώντας τις μεταβλητές κοστολόγησης και τις κατάλληλες τιμές τους (a = 113.000, b = 3.250 και n = 0,65) μπορεί να εξαχθεί το κόστος της δεξαμενής καθίζησης (Towler and Sinnott, 2012):

$$C_{e4} = a + b \cdot S^n = 531.086 \text{ €} \quad [3.4]$$

**Πίνακας 3.2.** Αγορά δεξαμενών για κοινό εξοπλισμό εγκαταστάσεων.

| Είδος Δεξαμενής | Μονάδες για το Μέγεθος S     | S <sub>Μικρότερο</sub> | S <sub>Μεγαλύτερο</sub> | a       | b     | n    |
|-----------------|------------------------------|------------------------|-------------------------|---------|-------|------|
| Πλωτής οροφής   | Δυναμικότητα, m <sup>3</sup> | 100                    | 10.000                  | 113.000 | 3.250 | 0,65 |
| Κωνικής οροφής  | Δυναμικότητα, m <sup>3</sup> | 10                     | 4.000                   | 5.800   | 1.600 | 0,7  |

### Στήλη Διήθησης

Για την εκτίμηση του παγίου κόστους κεφαλαίου της στήλης διήθησης χρησιμοποιείται το Σχήμα 3.2 (Timmerhaus et al., 2002). Με βάση το είδος (στήλη διήθησης πλακών και

πλαίσίων κοινού χάλυβα) και την τιμή της επιφάνειας της στήλης ( $2.126 \text{ m}^2$ ) υπολογίζεται η τιμή του κόστους:

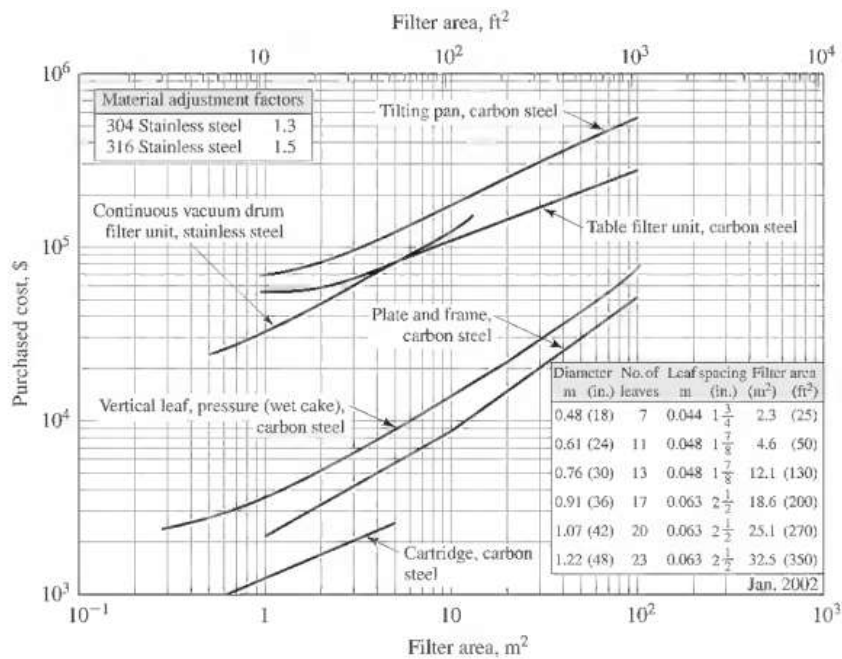
$$C_{e5a} = 492.000 \text{ €} \quad [3.5]$$

Επιπρόσθετα, η κοστολόγηση του μανδύα διήθησης λαμβάνει χώρα ακολουθώντας τον Πίνακα 3.1 (για εναλλάκτες θερμότητας). Έχοντας υπολογίσει ήδη την επιφάνεια του μανδύα θέρμανσης ( $1.958 \text{ m}^2$ ), μπορεί να επιλεγεί η κατάλληλη κατηγορία μανδύα (σωληνωτός πλωτής κεφαλής), καθώς και οι συμπληρωματικές παράμετροι της εξίσωσης ( $a = 11.000$ ,  $b = 115$  και  $n = 1$ ) και στη συνέχεια το κόστος του μανδύα θέρμανσης εξάγεται από τη σχέση (Towler and Sinnott, 2012):

$$C_{e5b} = a + b \cdot S^n = 193.721 \text{ €} \quad [3.6]$$

Επομένως, το συνολικό πάγιο κόστος της στήλης-μανδύα διήθησης είναι:

$$C_{e5} = 685.721 \text{ €} \quad [3.7]$$



Σχήμα 3.2. Διάγραμμα κόστους αγοράς της στήλης διήθησης.

### Αντιδραστήρας Υδρόλυσης

Για τον αντιδραστήρα υδρόλυσης, ο υπολογισμός του παγίου κόστους κεφαλαίου πραγματοποιείται με βάση τον Πίνακα 3.3. Για τον υπολογισμό χρησιμοποιείται ο ήδη γνωστός όγκος του αντιδραστήρα ( $18,2 \text{ m}^3$ ), και ακολουθώντας την επιλογή του είδους του αντιδραστήρα (στην υπό μελέτη περίπτωση επιλέγεται ως αναδευόμενος με μανδύα) προκύπτουν οι συμπληρωματικές παράμετροι της σχέσης κοστολόγησης. Συνεπώς, χρησιμοποιώντας τις τιμές  $a = 14.000$ ,  $b = 15.400$  και  $n = 0,7$  προκύπτει το κόστος του αντιδραστήρα υδρόλυσης (Towler and Sinnott, 2012):

$$C_{e6} = a + b \cdot S^n = 107.878 \text{ €} \quad [3.8]$$

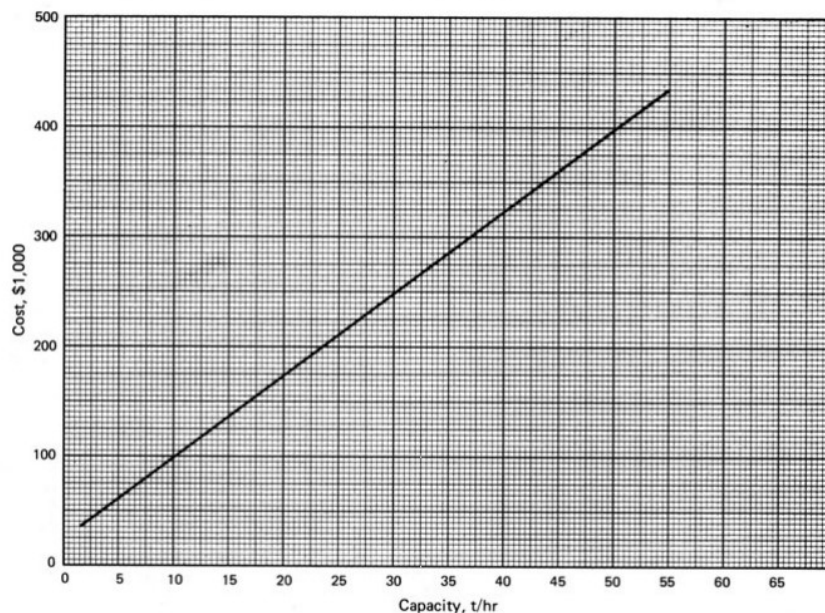
**Πίνακας 3.3.** Αγορά χημικών αντιδραστήρων για κοινό εξοπλισμό εγκαταστάσεων.

| Είδος Χημικού Αντιδραστήρα       | Μονάδες για το Μέγεθος S | S <sub>Μικρότερο</sub> | S <sub>Μεγαλύτερο</sub> | a      | b      | n   |
|----------------------------------|--------------------------|------------------------|-------------------------|--------|--------|-----|
| Αναδευόμενος με μανδύα           | Όγκος, m <sup>3</sup>    | 0,5                    | 100                     | 14.000 | 15.400 | 0,7 |
| Γυάλινος, αναδευόμενος με μανδύα | Όγκος, m <sup>3</sup>    | 0,5                    | 25                      | 13.000 | 34.000 | 0,5 |

### Φυγοκεντρητής 1

Με σκοπό να προκύψει το πάγιο κόστος κεφαλαίου του φυγοκεντρητή 1 χρησιμοποιείται το σχετικό διάγραμμα κοστολόγησης (Σχήμα 3.3). Αξιοποιώντας την τιμή της μαζικής παροχής του ρεύματος τροφοδοσίας στον φυγοκεντρητή (13.564 kg/day) προκύπτει το κόστος του (Towler and Sinnott, 2012):

$$C_{e7} = 26.000 \text{ €} \quad [3.9]$$



**Σχήμα 3.3.** Διάγραμμα κόστους προμήθειας φυγοκεντρητή.

### Διήθηση Μεμβρανών

Για την υπό μελέτη περίπτωση της διήθησης μεμβρανών, ο προσδιορισμός του παγίου κόστους κεφαλαίου της συσκευής απαιτεί την επιλογή του κατάλληλου είδους μεμβράνης.

Για τη συγκεκριμένη εφαρμογή επιλέγεται το είδος πλακών και πλαισίων. Το εύρος κοστολόγησης παρουσιάζεται στον Πίνακα 3.4 (Timmerhaus et al., 2002). Επιλέγοντας την τυπική τιμή των 350 €/m<sup>2</sup> και με βάση την επιφάνεια των μεμβρανών (1.385 m<sup>2</sup>) υπολογίζεται το σχετικό κόστος:

$$C_{e8} = 397.558 \text{ €} \quad [3.10]$$

**Πίνακας 3.4.** Κόστος προμήθειας μεμβρανών διήθησης.

| Είδος Μεμβράνης     | Κόστος €/m <sup>2</sup> |
|---------------------|-------------------------|
| Πλακών και πλαισίων | 250-400                 |
| Σπειροειδής         | 25-100                  |
| Κοίλες ίνες         | 10-20                   |
| Σωληνοειδής         | 250-400                 |
| Τριχοειδής          | 25-100                  |
| Κεραμικές           | 1.000-1.600             |

### Ομογενοποιητής

Για τη συσκευή ομογενοποίησης της βιομάζας μικροφυκών, καθώς δεν υπάρχουν συγκεκριμένα διαγράμματα ή πίνακες κοστολόγησης, ο άμεσος προσδιορισμός του παγίου κόστους κεφαλαίου λαμβάνει χώρα με εμπειρικό τρόπο. Μετά από μία σύντομη ανασκόπηση της σχετικής βιβλιογραφίας (Woods, 2007) παρατηρείται ότι ένας ομογενοποιητής υψηλής πίεσης με ογκομετρική παροχή 43,2 m<sup>3</sup>/day κοστολογείται περίπου στις 95.000 €. Υιοθετώντας στην παρούσα μελέτη αυτή τη γενική τιμή, για τη δεδομένη ογκομετρική παροχή 2,07 m<sup>3</sup>/day, το τελικό κόστος του ομογενοποιητή θα είναι:

$$C_{e9} = 3.745 \text{ €} \quad [3.11]$$

### Φυγοκεντρητής 2

Εντελώς όμοια με τη περίπτωση του πρώτου φυγοκεντρητή, χρησιμοποιείται το Σχήμα 3.3 και για τον δεύτερο φυγοκεντρητή της μονάδας. Σε αυτήν την περίπτωση, η τιμή της μαζικής παροχής του ρεύματος τροφοδοσίας στον φυγοκεντρητή είναι 4.906 kg/day, με αποτέλεσμα το κόστος του να προκύψει:

$$C_{e10} = 20.500 \text{ €} \quad [3.12]$$

### Υπερδιήθηση

Και στη συγκεκριμένη διεργασία το πρώτο βήμα για την κοστολόγηση είναι η επιλογή του καταλληλότερου είδους μεμβράνης. Γενικά, για την υπερδιήθηση θεωρούνται κατάλληλες οι κεραμικές μεμβράνες (Timmerhaus et al., 2002). Το εύρος κοστολόγησης της

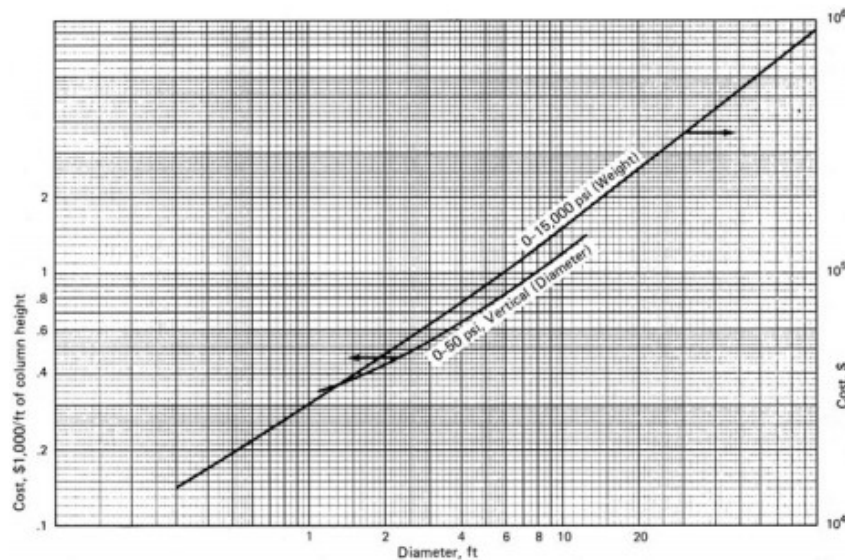
υπερδιήθησης μπορεί να φανεί στον Πίνακα 3.4. Επιλέγοντας την τυπική μέση τιμή των 1200 €/m<sup>2</sup> για τις κεραμικές μεμβράνες και με βάση τη γνωστή επιφάνεια των μεμβρανών (23,6 m<sup>2</sup>) προκύπτει το κόστος:

$$C_{e11} = 23.276 \text{ €} \quad [3.13]$$

### Δοχείο Εκχύλισης 1

Μία συσκευή εκχύλισης χαρακτηρίζεται από τον συνολικό λειτουργικό όγκο της, ενώ μπορεί να κοστολογηθεί ως προς το πάγιο κόστος κεφαλαίου ακολουθώντας τα δεδομένα του Σχήματος 3.4 (Guthrie and Kenneth, 1974). Πιο συγκεκριμένα, για τη στήλη εκχύλισης 1 αρχικά υπολογίζεται η διάμετρος της (5,5 m = 18 ft) και στη συνέχεια προσδιορίζεται το κόστος προμήθειας της:

$$C_{e12} = 205.000 \text{ €} \quad [3.14]$$



Σχήμα 3.4. Διάγραμμα κόστους αγοράς δοχείου εκχύλισης.

### Στήλη Απόσταξης 1

Γενικά για τις αποστακτικές στήλες, ο υπολογισμός του παγίου κεφαλαίου μπορεί να πραγματοποιηθεί με βάση το Σχήμα 3.4. Συγκεκριμένα, για τη στήλη απόσταξης 1 αρχικά προσδιορίζεται η διάμετρος της στήλης (4,9 m = 16 ft) και στη συνέχεια το κόστος της:

$$C_{e13a} = 205.001 \text{ €} \quad [3.15]$$

Επιπλέον, για την πλήρη κοστολόγηση της διάταξης, θα πρέπει να ληφθεί υπόψιν τόσο το κόστος του αναβραστήρα, όσο και αυτό του συμπυκνωτή. Αυτό θα επιτευχθεί με την βοήθεια του Πίνακα 3.1. Έχοντας υπολογίσει από τα ισοζύγια ενέργειας την απαιτούμενη επιφάνεια τους (160 m<sup>2</sup> και 40 m<sup>2</sup>, αντίστοιχα), επιλέγεται το επιθυμητό είδος εναλλάκτη

και αντικαθίστανται οι συμπληρωματικές παράμετροι στις εξισώσεις κοστολόγησης ( $a = 1.100$ ,  $b = 850$ ,  $n = 0,4$ ). Κατά συνέπεια, το κόστος του αναβραστήρα και κόστος του συμπυκνωτή υπολογίζεται κατά αντιστοιχία:

$$C_{e13b} = a + b \cdot S^n = 6.208 \text{ €} \quad [3.16]$$

$$C_{e13c} = a + b \cdot S^n = 3.963 \text{ €} \quad [3.17]$$

Τελικά, το συνολικό πάγιο κόστος της στήλης απόσταξης 1 είναι:

$$C_{e13} = 215.172 \text{ €} \quad [3.18]$$

### **Δοχείο Εκχύλισης 2**

Ακολουθώντας τη μεθοδολογία του πρώτου δοχείου εκχύλισης, από το Σχήμα 3.4 προκύπτει και το κόστος αγοράς του δεύτερου δοχείου εκχύλισης. Υπολογίζοντας και αξιοποιώντας τη διάμετρο του δοχείου ( $4,5 \text{ m} = 14,7 \text{ ft}$ ) προσδιορίζεται το ζητούμενο κόστος:

$$C_{e14} = 147.600 \text{ €} \quad [3.19]$$

### **Στήλη Απόσταξης 2**

Η δεύτερη στήλη απόσταξης του διαγράμματος ροής διαφέρει από την πρώτη μόνο στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της. Συνεπώς, για να προσδιοριστεί το κόστος παγίου κεφαλαίου της δεύτερης στήλης απόσταξης ακολουθείται η ίδια ακριβώς διαδικασία (Σχήμα 3.4) και η τιμή προκύπτει:

$$C_{e15a} = 63.422 \text{ €} \quad [3.20]$$

Πριν την τελική κοστολόγηση, υπολογίζονται οι επιφάνειες του αναβραστήρα ( $23 \text{ m}^2$ ) και του συμπυκνωτή ( $5,8 \text{ m}^2$ ) και επιλέγονται οι παράμετροι κοστολόγησης ( $a = 11.000$ ,  $b = 850$ ,  $n = 0,4$ , Πίνακας 3.1). Με αυτόν τον τρόπο υπολογίζεται το κόστος του αναβραστήρα και του συμπυκνωτή της δεύτερης στήλης απόσταξης, αντίστοιχα:

$$C_{e15b} = a + b \cdot S^n = 1.385 \text{ €} \quad [3.21]$$

$$C_{e15c} = a + b \cdot S^n = 3.963 \text{ €} \quad [3.22]$$

Επομένως, το συνολικό πάγιο κόστος της στήλης απόσταξης 2 είναι:

$$C_{e15} = 68.770 \text{ €} \quad [3.23]$$

Ακολουθώντας την αναλυτική καταγραφή της μεθοδολογίας κοστολόγησης των 15 σημαντικότερων συσκευών της ολοκληρωμένης μονάδας και των αποτελεσμάτων όσον αφορά το πάγιο κόστος προμήθειας τους μπορεί να προκύψει ο συγκεντρωτικός Πίνακας 3.5. Σε αυτόν παρουσιάζονται συγκριτικά οι τιμές του κόστους αγοράς των συσκευών, καθώς

επίσης και η αξία της συνολικής κοστολόγησης της προμήθεια εξοπλισμού, ως άθροισμα των επιμέρους τιμών:

$$C_p = 4.239.486 \text{ €} \quad [3.24]$$

**Πίνακας 3.5.** Επιμέρους πάγιο κόστος προμήθειας των συσκευών και συνολικό.

| Είδος Εξοπλισμού/Διεργασία           | Σύμβολο              | Τιμή               | Ποσοστό (%) |
|--------------------------------------|----------------------|--------------------|-------------|
| Στήλη προσρόφησης                    | C <sub>e1</sub>      | 246.000 €          | 5,8         |
| Εναλλάκτης θερμότητας                | C <sub>e2</sub>      | 2.374 €            | 0,05        |
| Φωτό-Βιοαντιδραστήρας                | C <sub>e3</sub>      | 1.560.200 €        | 36,8        |
| Δεξαμενή καθίζησης                   | C <sub>e4</sub>      | 531.086 €          | 12,5        |
| Στήλη διήθησης                       | C <sub>e5</sub>      | 685.721 €          | 16,2        |
| Αντιδραστήρας υδρόλυσης              | C <sub>e6</sub>      | 107.878 €          | 2,5         |
| Φυγοκεντρητής 1                      | C <sub>e7</sub>      | 26.000 €           | 0,6         |
| Διήθηση μεμβρανών                    | C <sub>e8</sub>      | 397.558 €          | 9,4         |
| Ομογενοποιητής                       | C <sub>e9</sub>      | 3.745 €            | 0,09        |
| Φυγοκεντρητής 2                      | C <sub>e10</sub>     | 20.500 €           | 0,48        |
| Υπερδιήθηση                          | C <sub>e11</sub>     | 23.276 €           | 0,5         |
| Δοχείο εκχύλισης 1                   | C <sub>e12</sub>     | 205.000 €          | 4,8         |
| Στήλη απόσταξης 1                    | C <sub>e13</sub>     | 215.172 €          | 5,1         |
| Δοχείο εκχύλισης 2                   | C <sub>e14</sub>     | 147.600 €          | 3,5         |
| Στήλη απόσταξης 2                    | C <sub>e15</sub>     | 68.770 €           | 1,6         |
| <b>Συνολική προμήθεια εξοπλισμού</b> | <b>C<sub>p</sub></b> | <b>4.239.486 €</b> | <b>100</b>  |

Από τα αποτελέσματα του Πίνακα 3.5 μπορούν να προκύψουν κάποια συγκεκριμένα συμπεράσματα. Αρχικά, για τη δυναμικότητα του Σεναρίου I (1.000 tn/yr) -η οποία θεωρείται ιδιαίτερως μικρή, τουλάχιστον για τα δεδομένα μίας χημικής βιομηχανίας- το συνολικό πάγιο κόστος προμήθειας του εξοπλισμού είναι υψηλό. Αυτό οφείλεται σε σημαντικό βαθμό στο κόστος αγοράς του φωτό-βιοαντιδραστήρα (1.560.200 €, 36,8% του συνολικού παγίου κόστους εξοπλισμού). Όπως είναι γνωστό, οι διατάξεις καλλιέργειας μικροφυκών είναι ιδιαίτερως κοστοβόρες, τόσο ως προς την πάγια επένδυση, όσο και ως προς το κόστος λειτουργίας (Zhu et al., 2018). Για τον σκοπό αυτό, σε τέτοιου είδους τεχνολογίες και μονάδες παραγωγής πρωταρχικό στόχο πρέπει να αποτελεί ο αποτελεσματικός σχεδιασμός του φωτό-βιοαντιδραστήρα και η βελτιστοποίησή του, ως προς τον ρυθμό παραγωγής βιομάζας και την ποσοστιαία συσσώρευση των βιοχημικών προϊόντων ενδιαφέροντος. Με αυτόν τον τρόπο θα ελαχιστοποιηθούν οι απαιτήσεις στον



όγκο του φωτό-βιοαντιδραστήρα (άρα και το πάγιο κόστος), καθώς και στις πρώτες ύλες, χρόνο παραμονής, κλπ. (κατά επέκταση και το λειτουργικό κόστος).

Ο δεύτερος σημαντικότερος παράγοντας/διεργασία που επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό το κόστος παγίου κεφαλαίου είναι η στήλη διήθησης (685.721 €, 16,2% του συνολικού παγίου κόστους εξοπλισμού). Το υψηλό κόστος οφείλεται στις υψηλές απαιτήσεις αφυδάτωσης της βιομάζας όσον αφορά την ποσότητα του νερού που πρέπει να απομακρυνθεί. Σε όλα τα γνωστά συστήματα καλλιέργειας μικροφυκών, το συγκεκριμένο στάδιο αφυδάτωσης της βιομάζας είναι ιδιαίτερος απαιτητικό ως προς το κόστος (Morais et al., 2020). Στην υπό μελέτη περίπτωση, το κόστος αυξάνεται σημαντικά λόγω της υψηλής αποτελεσματικότητας της διεργασίας και της απαίτησης λειτουργίας της διήθησης υπό μεγάλη συμπίεστικότητα του πλακούντα. Πιο συγκεκριμένα, επειδή οι παραπάνω διαδικασίες είναι ιδιαίτερα κοστοβόρες ως προς την πάγια επένδυση, θα πρέπει ο βαθμός απόδοσης να είναι όσο το δυνατόν υψηλότερος. Ιδιαίτερα βοηθητικό για τον περιορισμό του κόστους καθίσταται το ρεύμα ανακύκλωσης του νερού, το οποίο απομακρύνει τη διαχωριζόμενη ποσότητα νερού από τη στήλη και την οδηγεί στον φωτό-βιοαντιδραστήρα. Επιπλέον, ένας ακόμη λόγος αύξησης του παγίου κόστους της διήθησης είναι η προσθήκη στη διάταξη του μανδύα διήθησης, για τον αποτελεσματικό έλεγχο της θερμοκρασίας.

Το αμέσως επόμενο καθοριστικό τμήμα του εξοπλισμού είναι η δεξαμενή καθίζησης (531.086 €, 12,5% του συνολικού παγίου κόστους). Ο βασικότερος λόγος που το κόστος προμήθειας της καθίζησης είναι υψηλό είναι οι μεγάλες μαζικές παροχές που καλείται να διαχειριστεί η δεξαμενή (κυρίως όσον αφορά το νερό). Όπως μπορεί να φανεί στο διάγραμμα ροής της μονάδας, η δεξαμενή αποτελεί το πρώτο στάδιο επεξεργασίας της βιομάζας αμέσως μετά τον φωτό-βιοαντιδραστήρα. Αποτέλεσμα είναι ο σχεδιασμός της δεξαμενής να καταλήγει σε πολύ υψηλές τιμές της απαιτούμενης επιφάνειας καθίζησης και κατά επέκταση σε υψηλό πάγιο κόστος. Και στη συγκεκριμένη περίπτωση αποφεύγεται η περαιτέρω αύξηση του κόστους χάρη στη σύνδεση του ρεύματος ανακύκλωσης του νερού, από τη δεξαμενή στον φωτό-βιοαντιδραστήρα.

Ο συνδυασμός της δεξαμενής καθίζησης με τη στήλη διήθησης ορίζουν τη διεργασία αφυδάτωσης της βιομάζας, η οποία πραγματοποιείται σε αυτά τα δύο στάδια και σύμφωνα με τη βιβλιογραφία είναι από τα περισσότερο απαιτητικά στάδια ως προς το πάγιο κόστος (Morais et al., 2020). Παρόλο που η συνεισφορά του σταδίου καλλιέργειας και παραγωγής βιομάζας είναι σημαντικότερο, η βελτιστοποίηση του σταδίου αφυδάτωσης κρίνεται το ίδιο σημαντική για τη μονάδα.

Από τον Πίνακα 3.5 προκύπτει πως, εκτός των τριών αυτών συσκευών, υπάρχουν και άλλα στάδια της ολοκληρωμένης διεργασίας που συνεισφέρουν αρκετά (αλλά σε μικρότερο βαθμό) στο πάγιο κόστος της μονάδας. Οι διεργασίες αυτές αντιστοιχούν στα στάδια διαχωρισμού των βιοχημικών προϊόντων, π.χ. η διήθηση μεμβρανών και η απόσταξη, αλλά και στην προεπεξεργασία του αερίου ρεύματος τροφοδοσίας (στήλη προσρόφησης).

Πέρα από πάγιο κόστος προμήθειας του εξοπλισμού, τα υπόλοιπα κόστη παγίου κεφαλαίου υπολογίζονται με βάση αυτό, πολλαπλασιασμένα με κατάλληλους συντελεστές (Towler and Sinnott, 2012). Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.6. Όπως προκύπτει από τον πίνακα, το συνολικό κόστος παγίου κεφαλαίου υπολογίστηκε ίσο με:

$$FCI = 18.314.578 \text{ €} \quad [3.25]$$

**Πίνακας 3.6.** Ανάλυση κόστους παγίου κεφαλαίου (FCI).

| Πάγιο Κόστος  | Συντελεστής  | Είδος Κόστους    | Τιμή                |
|---|--------------|------------------|---------------------|
| Προμήθεια εξοπλισμού                                | $C_p$ (100%) | Άμεσο κόστος DC  | 4.239.486 €         |
| Εγκατάσταση εξοπλισμού                              | 30%          | Άμεσο κόστος DC  | 1.271.846 €         |
| Αυτόματος έλεγχος και όργανα                        | 10%          | Άμεσο κόστος DC  | 423.948 €           |
| Σωληνώσεις  | 40%          | Άμεσο κόστος DC  | 1.695.794 €         |
| Ηλεκτρολογικός εξοπλισμός                           | 25%          | Άμεσο κόστος DC  | 1.059.871 €         |
| Κτίρια  | 35%          | Άμεσο κόστος DC  | 1.483.820 €         |
| Βελτίωση οικοπέδου & εγκατάσταση βοηθητικών παροχών | 75%          | Άμεσο κόστος DC  | 3.179.614 €         |
| Οικόπεδο  | 5%           | Άμεσο κόστος DC  | 211.974 €           |
| Μελέτη και επίβλεψη                                 | 10%          | Έμμεσο κόστος IC | 1.356.635 €         |
| Έξοδα ανεγέρσεως & αμοιβή εργολάβου                 | 15%          | Έμμεσο κόστος IC | 2.034.953 €         |
| <b>Συνολικό κόστος παγίου κεφαλαίου</b>             |              |                  | <b>18.314.578 €</b> |

### 3.3. Ανάλυση Λειτουργικού Κόστους

Ως ορισμός, λειτουργικό κόστος ή κόστος κατά προορισμό καλείται το ομαδοποιημένο κατά είδος κόστος που πραγματοποιείται στις διάφορες λειτουργίες ή δραστηριότητες της οικονομικής μονάδας. Το λειτουργικό κόστος σχηματίζεται από στοιχεία διαφορετικής φύσεως που έχουν τον ίδιο σκοπό-προορισμό. Το λειτουργικό κόστος (TPC) υπολογίζεται από τη σχέση (Κούκος, 2010):

$$TPC = 1,22 \cdot (C_{rm} + C_{ut} + C_{wt}) + (2,66 \cdot C_{ol}) + (0,295 \cdot FCI) \quad [3.26]$$

Όπου:

$C_{rm}$ : Το κόστος των πρώτων υλών.

$C_{ut}$ : Το κόστος των βοηθητικών παροχών.

$C_{wt}$ : Το κόστος επεξεργασίας των παραγόμενων αποβλήτων.

$C_{ol}$ : Το κόστος άμεσης εργασίας.

FCI: Το κόστος παγίου κεφαλαίου.

Για τον υπολογισμό του λειτουργικού κόστους της υπό μελέτης μονάδας χρησιμοποιούνται τα ισοζύγια μάζας και ενέργειας, καθώς και η μεθοδολογία σχεδιασμού των επιμέρους

συσκευών, όπως αναλύθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται παρακάτω αντιστοιχούν στο Σενάριο Ι για τη λειτουργία της μονάδας.

### **Κόστος Πρώτων Υλών ( $C_{rm}$ )**

Πρόκειται για το κόστος εισαγωγής της ποσότητας *Arthrospira* (προκαλλιέργεια), της ποσότητας  $NH_4Cl$  και των υπόλοιπων θρεπτικών συστατικών και του νερού. Οι ποσότητες και οι τιμές των πρώτων υλών παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.7.

**Πίνακας 3.7.** Κόστος πρώτων υλών (Yunhua et al., 2018, Zujeva, 2020).

| Είδος Πρώτης Ύλης  | Ποσότητα (tn/yr) | Κόστος (€/tn) | Συνολική Τιμή (€/yr) |
|--------------------|------------------|---------------|----------------------|
| <i>Arthrospira</i> | 33,8             | 8.888,8       | 300.441,4            |
| $NH_4Cl$           | 5,87             | 92,3          | 541,8                |
| Υπόλοιπα θρεπτικά  | 52               | 92,3          | 4.799,6              |
| Νερό               | 40.358,4         | 0,15          | 6.053,8              |

Όπως ήταν αναμενόμενο, το σημαντικότερο κόστος ως πρώτη ύλη προέρχεται από την προκαλλιέργεια του επιλεγμένου στελέχους μικροφυκών. Οι υπόλοιπες πρώτες ύλες, συμπεριλαμβανομένου του νερού, συνεισφέρουν πολύ λιγότερο σε αυτό το κόστος. Συνεπώς, με τη βοήθεια του Πίνακα 3.7 υπολογίζεται το τελικό κόστος πρώτων υλών:

$$C_{rm} = 311.973 \text{ €/yr} \quad [3.27]$$

### **Κόστος Βοηθητικών Παροχών ( $C_{ut}$ )**

Το κόστος των βοηθητικών παροχών είναι πολύ σημαντικό διότι συνήθως διακατέχει την πρώτη θέση από άποψη τάξης μεγέθους στη μονάδα παραγωγής (Κούκος, 2010). Περιλαμβάνει τα κόστη νερού και ατμού που αξιοποιήθηκαν σε κάποιες διεργασίες και την ηλεκτρική ενέργεια. Τα κόστη τα οποία περιλαμβάνει στην παρούσα μονάδα παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.8.

Είναι ξεκάθαρο ότι η πιο ενεργειακά κοστοβόρα συσκευή της μονάδας είναι ο μανδύας διήθησης (1.381.103 €/yr), ο οποίος σε κάθε περίπτωση χρίζει βελτιστοποίησης. Αυτό το γεγονός οφείλεται σχεδόν πλήρως στις υψηλές απαιτήσεις σε ποσότητα ατμού θέρμανσης. Η τιμή κόστους του ατμού θέρμανσης (24,6 €/tn) είναι πολύ μεγαλύτερη από την τιμή κόστους του νερού ψύξης (0,15 €/tn) και αυτό κατά κανόνα καθιστά τις διεργασίες θέρμανσης πιο απαιτητικές από τις διεργασίες ψύξης. Στη συνέχεια, ακολουθούν με μεγάλη απόκλιση ο αναβραστήρας 1 (22.821,4 €/yr), ο οποίος καταναλώνει θερμική ενέργεια, και ο αντιδραστήρας υδρόλυσης (20.915,2 €/yr), ο οποίος καταναλώνει κυρίως ηλεκτρική

ενέργεια και διακατέχει την πρώτη θέση όσον αφορά το κόστος αυτής στη μονάδα. Γενικότερα, είναι φανερό ότι το μεγαλύτερο ποσοστό του κόστους των βοηθητικών παροχών οφείλεται στην κατανάλωση ατμού θέρμανσης. Με τα δεδομένα του Πίνακα 3.8 υπολογίζεται το συνολικό κόστος βοηθητικών παροχών:

$$C_{ut} = 1.450.622 \text{ €/yr} \quad [3.28]$$

**Πίνακας 3.8.** Κόστος βοηθητικών παροχών (Κούκος, 2010).

| Διεργασία της Μονάδας Παραγωγής   | Μέσο Θέρμανσης ή Ψύξης | Ποσότητα (tn/yr) | Κόστος (€/tn) | Ηλεκτρική Ενέργεια (kWh/m <sup>3</sup> ) | Κόστος (€/kWh) | Συνολική Τιμή (€/yr) |
|-----------------------------------|------------------------|------------------|---------------|--|----------------|----------------------|
| Εναλλάκτης θερμότητας             | Νερό ψύξης             | 9.648,28         | 0,15          | -  | -              | 1.447,2              |
| Μανδύας διήθησης                  | Ατμός θέρμανσης        | 56.142,4         | 24,6          | -  | -              | 1.381.103            |
| Αναβραστήρας 1                    | Ατμός θέρμανσης        | 927,71           | 24,6          | -  | -              | 22.821,4             |
| Συμπυκνωτής 1                     | Νερό ψύξης             | 97.873,42        | 0,15          | -  | -              | 14.681               |
| Αναβραστήρας 2                    | Ατμός θέρμανσης        | 132,67           | 24,6          | -  | -              | 3.263,7              |
| Συμπυκνωτής 2                     | Νερό ψύξης             | 13.996,79        | 0,15          | -  | -              | 2.009,4              |
| Σύστημα ψεκασμού PBR              | Νερό ψύξης             | 10.773,1         | 0,15          | -  | -              | 1.616                |
| Αντιδραστήρας                     | -                      | -                | -             | 1,5                                      | 0,116          | 20.915,2             |
| Φυγοκεντρητής 1 και 2             | -                      | -                | -             | 8,7                                      | 0,116          | 105,6                |
| Υπερδιήθηση και διήθηση μεμβρανών | -                      | -                | -             | 5,8                                      | 0,116          | 973,4                |
| Φωτό-βιοαντιδραστήρας             | -                      | -                | -             | 0,2                                      | 0,116          | 359,2                |
| Ομογενοποιητής                    | -                      | -                | -             | 0,2                                      | 0,116          | 6.140                |

### **Κόστος Επεξεργασίας Αποβλήτων ( $C_{wt}$ )**

Λαμβάνεται υπόψη το κόστος επεξεργασίας του ρεύματος των υπολειμμάτων και του νερού που εξέρχεται από το σύστημα (η ποσότητα που δεν ανακυκλώνεται). Εφόσον τα απόβλητα είναι μη τοξικά το κόστος παρουσιάζεται στον Πίνακα 3.9.

**Πίνακας 3.9.** Κόστος επεξεργασίας αποβλήτων (Κούκος, 2010).

| Απόβλητα           | Ποσότητα (tn/day) | Κόστος (€/tn) | Συνολική Τιμή (€/yr) |
|--------------------|-------------------|---------------|----------------------|
| Υπόλειμμα και νερό | 1,09              | 32,36         | 11.813,6             |

Το υδατικό ρεύμα υπολείμματος που περιέχεται στο ρεύμα αποβλήτων και εξέρχεται από τη μονάδα παραγωγής χρίζει επεξεργασίας πριν τη διάθεση του. Πρόκειται για τη λιγότερη κοστοβόρα διαδικασία της μονάδας παραγωγής, καθώς η παροχή του συγκεκριμένου ρεύματος είναι σχετικά μικρή και τα απόβλητα είναι μη τοξικά. Για τη συγκεκριμένη μονάδα το συνολικό κόστος επεξεργασίας αποβλήτων υπολογίστηκε (Πίνακας 3.9):

$$C_{wt} = 11.813 \text{ €/yr} \quad [3.29]$$

### Κόστος Άμεσης Εργασίας ( $C_{ol}$ )

Στη συγκεκριμένη κατηγορία περιλαμβάνεται το κόστος αμοιβής όλου του ανθρώπινου δυναμικού που εργάζεται στη συγκεκριμένη μονάδα παραγωγής. Οι διάφορες επιλογές, παραδοχές και τα σχετικά αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.10.

Το μεγαλύτερο ποσοστό του κόστους άμεσης εργασίας οφείλεται στους βιομηχανικούς εργάτες. Αυτό το γεγονός συμβαίνει λόγω των σχετικά μεγάλων διαστάσεων της μονάδας παραγωγής, το οποίο οδηγεί στις υψηλές απαιτήσεις σε αριθμό βιομηχανικών εργατών. Επίσης, χρίζει απαραίτητη η παρουσία τουλάχιστον 5 μηχανικών, για την επίβλεψη, έλεγχο και πιθανή βελτιστοποίηση της μονάδας. Για την ομαλή λειτουργία της, σύμφωνα με τον Πίνακα 3.10, το συνολικό κόστος άμεσης εργασίας που απαιτείται είναι:

$$C_{OL} = 982.200 \text{ €/yr} \quad [3.30]$$

**Πίνακας 3.10.** Κόστος άμεσης εργασίας (Κούκος, 2010).

| Ανθρώπινο Δυναμικό             | Κόστος (€/yr) | Αριθμός Ατόμων | Συνολική Τιμή (€/yr) |
|--------------------------------|---------------|----------------|----------------------|
| Βιομηχανικός εργάτης           | 21.000        | 30             | 630.000              |
| Μηχανικός                      | 26.100        | 5              | 130.500              |
| Ανώτερος διοικητικός υπάλληλος | 49.200        | 2              | 98.400               |
| Πωλητής                        | 13.300        | 5              | 66.500               |
| Διευθυντής παραγωγής           | 28.400        | 2              | 56.800               |

Ακολουθώντας τους προηγούμενους υπολογισμούς για τα επιμέρους λειτουργικά κόστη, προκύπτει το συνολικό λειτουργικό κόστος από την Εξίσωση 3.26:

$$TPC = 10.180.232 \text{ €/yr} \quad [3.31]$$

Συγκρίνοντας τις πέντε παραμέτρους στις οποίες βασίζεται ο τύπος υπολογισμού του λειτουργικού κόστους παρατηρείται ότι η βασικότερη είναι το κόστος παγίου κεφαλαίου (FCI), μέσω της απόσβεσης του. Στη συνέχεια, αισθητή είναι η συνεισφορά του κόστους των βοηθητικών παροχών και του κόστους της άμεσης εργασίας ( $C_{OL}$ ). Ως πρώιμο συμπέρασμα μπορεί να ειπωθεί πως, με βάση τη δυναμικότητα της μονάδας παραγωγής (1.000 tn/yr), η τιμή του λειτουργικού (10.180.232 €/yr) –όπως και του πάγιου κόστους (18.314.578 €)- είναι υψηλές. Αυτό οφείλεται κατά ένα μεγάλο ποσοστό στον ακριβό εξοπλισμό και κατά κύριο λόγο στην αγορά του φωτό-βιοαντιδραστήρα. Ωστόσο προβλέπεται πολύ γρήγορη απόσβεση κεφαλαίου, η οποία θα αναλυθεί παρακάτω.

### 3.4. Υπολογισμός Οικονομικών Δεικτών

Για την τελική οικονομική αξιολόγηση κάθε μονάδας παραγωγής είναι απαραίτητος ο υπολογισμός συγκεκριμένων οικονομικών δεικτών προκειμένου να γνωστοποιηθούν τα επίπεδα βιωσιμότητας της, καθώς και να αναλυθούν τα περιθώρια οικονομικής βελτίωσης (Μουζά, 2010). Οι δείκτες οι οποίοι θα αναλυθούν είναι οι εξής:

- Το ετήσιο λειτουργικό κόστος (TPC).
- Η απόδοση επένδυσης (Return On Investment, ROI).
- Το κόστος παραγωγής βιομάζας ( $C_{CB}$ ).
- Το κόστος παραγωγής συνολικών προϊόντων ( $C_{CP}$ ).
- Το ετήσιο καθαρό κέρδος (P).
- Το κέρδος εγχειρήματος (Venture Profit, V)
- Ο χρόνος εξόφλησης κεφαλαίου (Pay out time, POT)

Προκειμένου να υπολογιστούν όλοι οι παραπάνω δείκτες είναι απαραίτητος ο υπολογισμός αρχικά των εσόδων της μονάδας, λόγω της διάθεσης των τεσσάρων προϊόντων στην αγορά. Αυτό παρουσιάζεται στον Πίνακα 3.11. Όπως και στις προηγούμενες παραγράφους, η οικονομική ανάλυση που καταγράφεται αμέσως παρακάτω αντιστοιχεί στο Σενάριο I.

Είναι αντιληπτό ότι η μεγαλύτερη πηγή εσόδων στη μονάδα παραγωγής προέρχεται από την πώληση της φυκοκυανίνης, η οποία καλύπτει περίπου το 97% των συνολικών εσόδων. Συνεπώς, τα συνολικά (ακαθάριστα) έσοδα ανά έτος της μονάδας παραγωγής, όπως προκύπτουν από τον Πίνακα 3.11 είναι:

$$\text{Έσοδα} = 19.982.811 \text{ €/yr} \quad [3.32]$$

**Πίνακας 3.11.** Έσοδα λόγω διάθεσης των προϊόντων στην αγορά  
(Chaiklahan et al., 2021, Muuner et al., 2021, Karamerou et al., 2021).

| Βιοχημικό Προϊόν | Δυναμικότητα (tn/yr) | Αξία (€/tn) | Συνολικά Έσοδα (€/yr) |
|------------------|----------------------|-------------|-----------------------|
| Φυκοκυανίνη      | 38,3                 | 500.000     | 19.316.923            |
| Λιπίδια          | 134,7                | 790         | 106.865               |
| Σάκχαρα          | 78,1                 | 600         | 46.899                |
| Πρωτεΐνες        | 426,7                | 1.200       | 512.123               |

Είναι άξιο να σημειωθεί ότι η αξία της φυκοκυανίνης (500.000 €/tn) είναι πολύ μεγαλύτερη από την αξία των υπόλοιπων προϊόντων (περίπου 500 φορές μεγαλύτερη). Έτσι, παρόλο που παρουσιάζει τη χαμηλότερη τιμή δυναμικότητας (38,3 tn/yr) συγκριτικά με τα υπόλοιπα προϊόντα, αποφέρει τα περισσότερα έσοδα της μονάδας. Αυτό συμβαίνει λόγω των ιδιαίτερων εφαρμογών της φυκοκυανίνης, π.χ., στη βιομηχανία τροφίμων ως φυσική βαφή, σε καλλυντικά και φάρμακα ως ισχυρός αντιοξειδωτικός παράγοντας, που της δίνουν πολύ μεγάλη αξία. Αμέσως μετά ακολουθούν οι πρωτεΐνες, ως δεύτερη σημαντικότερη πηγή εσόδων. Η αξία τους (1.200 €/tn) οφείλεται κυρίως στη χρήση τους σε συμπληρώματα διατροφής ή λειτουργικά τρόφιμα. Τέλος, τα λιπίδια και τα σάκχαρα διατηρούν τις χαμηλότερες τιμές (790 και 600 €/tn, αντίστοιχα), καθώς οι στοχευμένες εφαρμογές τους δεν αντικατοπτρίζουν κλάδους της αγοράς με υψηλό κέρδος. Συγκεκριμένα, τα λιπίδια χρησιμοποιούνται κυρίως για την παραγωγή βιοκαυσίμων και συμπληρωμάτων διατροφής, ενώ τα σάκχαρα ως μέσο σταθεροποίησης γαλακτώματος ή ως βιο-κροκιδωτικό και για την απομάκρυνση βαρέων μετάλλων κατά την επεξεργασία μολυσμένου νερού.

### **Ετήσιο Ακαθάριστο και Καθαρό Κέρδος (P)**

Το συνολικό ακαθάριστο κέρδος ανά έτος υπολογίζεται αφαιρώντας το λειτουργικό κόστος από τα συνολικά έσοδα. Για τη συγκεκριμένη περίπτωση είναι:

$$\text{Κέρδος/έτος} = 19.982.811 - 10.180.232 = 9.802.579 \text{ €/yr} \quad [3.33a]$$

Το καθαρό κέρδος ανά έτος υπολογίζεται αφαιρώντας από το συνολικό ακαθάριστο κέρδος τα σταθερά κόστη (FC) (απόσβεση, φόροι, ασφάλιση, κτλ.) (2.564.041 €/yr) και τα γενικά έξοδα (GE) (1.934.244 €/yr). Επομένως προκύπτει:

$$P = 9.802.579 - (2.564.041 + 1.934.244) = 5.304.294 \text{ €/yr} \quad [3.33b]$$

### **Απόδοση Επένδυσης (ROI)**

Γενικά, η απόδοση επένδυσης (ROI) είναι ένας δείκτης που χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση της απόδοσης μίας επένδυσης ή για να συγκρίνει την αποδοτικότητα διαφορετικών επενδύσεων (Μουζά, 2010). Συγκεκριμένα, το ROI ποσοτικοποιεί πόσο αποτελεσματικά μία επιχείρηση χρησιμοποιεί τα κεφάλαια της για να παράγει κέρδος, συνεπώς είναι ένας πολύ δημοφιλής δείκτης λόγω της ευελιξίας και απλότητας του. Εάν η επένδυση δεν έχει θετικό πρόσημο απόδοσης ή αν υπάρχουν άλλες επενδύσεις με υψηλότερη απόδοση, τότε η υπό μελέτη επένδυση δεν θα πρέπει να αναληφθεί. Για τον υπολογισμό του ROI, το όφελος (απόδοση) μίας επένδυσης διαιρείται με το κόστος της και το αποτέλεσμα εκφράζεται ως ποσοστό. Αυτό παρουσιάζεται στην παρακάτω εξίσωση:

$$ROI = \frac{\text{Κέρδος επένδυσης} - \text{Κόστος επένδυσης}}{\text{Κόστος επένδυσης}} \quad [3.34]$$

Στην περίπτωση του συγκεκριμένου σεναρίου παραγωγής, ο δείκτης διαμορφώνεται:

$$ROI = \frac{9.802.579}{\text{TPC+FCI}} \cdot 100 = 0,344 \cdot 100 = 34,4 \% \quad [3.35]$$

Η τιμή του ROI που υπολογίστηκε είναι ιδιαίτερα ελπιδοφόρα για τη συγκεκριμένη μονάδα. Γενικότερα, μία ετήσια απόδοση επένδυσης μεγαλύτερη από 7-10% θεωρείται περισσότερο αποδεκτή για μία τέτοιου είδους επένδυση.

### **Κόστος Παραγωγής Βιομάζας**

Το κόστος παραγωγής βιομάζας ορίζεται ως το λειτουργικό κόστος της μονάδας προς την συνολική ποσότητα βιομάζας που εξέρχεται από τον φωτό-βιοαντιδραστήρα, χωρίς την ποσότητα του νερού (αντιστοιχεί στη δυναμικότητα της μονάδας):

$$\text{Κόστος παραγωγής βιομάζας} = \frac{\text{TPC}}{\text{Ποσότητα βιομάζας}} = 9,06 \text{ €/kg} \quad [3.36]$$

Η τιμή του κόστους παραγωγής βιομάζας κινείται σε συγκριτικά επίπεδα με το εύρος τιμών που κυκλοφορούν στο εμπόριο (αναλύθηκε στην προηγούμενη ενότητα). Αυτό οφείλεται στη σχετικά μικρή τιμή της δυναμικότητας της μονάδας. Είναι αναμενόμενο πως όσο θα αυξάνεται η τιμή της δυναμικότητας τόσο θα μειώνεται το κόστος παραγωγής βιομάζας.

### **Κόστος Παραγωγής Συνολικών Προϊόντων**

Αντίστοιχα, το κόστος παραγωγής των συνολικών βιοχημικών προϊόντων ορίζεται ως το λειτουργικό κόστος της μονάδας προς το άθροισμα των ποσοτήτων των τεσσάρων προϊόντων που εξέρχονται από τη μονάδα παραγωγής:

$$\text{Κόστος παραγωγής προϊόντων} = \frac{\text{TPC}}{\text{Άθροισμα ποσοτήτων προϊόντων}} = 15 \text{ €/kg} \quad [3.37]$$

Αναλογικά με το κόστος παραγωγής βιομάζας, όσο αυξάνεται η τιμή της δυναμικότητας της μονάδας τόσο μειώνεται και η τιμή του κόστους παραγωγής συνολικών προϊόντων. Στη



συγκεκριμένη περίπτωση, η τιμή που υπολογίστηκε ανήκει στο χαμηλότερο εύρος τιμών του κόστους, όσον αφορά ένα βιοδιυλιστήριο 3<sup>ης</sup> γενιάς.

### **Κέρδος Εγχειρήματος (V)**

Το κέρδος εγχειρήματος προκύπτει αφαιρώντας από τα καθαρά κέρδη τις δαπάνες του πάγιου κεφαλαίου και του κεφαλαίου κίνησης, χρησιμοποιώντας ως κοινό επιτόκιο την ελάχιστη αποδεκτή απόδοση κεφαλαίου (Μουζά, 2010). Ακολουθώντας τη συγκεκριμένη λογική, το κέρδος εγχειρήματος του Σεναρίου Ι δίνεται από τη σχέση:

$$V = P - i_m \cdot (TPC + FCI) = 1.884.917 \text{ €/yr} \quad [3.38]$$

Όπου:

P: το καθαρό κέρδος (5.304.294 €/yr).

$i_m$ : η ελάχιστη αποδεκτή απόδοση κεφαλαίου (0,12).

Είναι φανερό πως η αρχική οικονομική ανάλυση οδηγεί σε μία τιμή του κέρδους εγχειρήματος ιδιαιτέρως ελπιδοφόρα για τη μονάδα. Αναμένεται πως η περαιτέρω ανάλυση και βελτιστοποίηση θα καταστήσει το εγχείρημα οικονομικά βιώσιμο.

### **Χρόνος Εξόφλησης Κεφαλαίου (POT)**

Με τον όρο χρόνος εξόφλησης κεφαλαίου ορίζεται γενικά ο χρόνος που χρειάζεται για να εξισωθούν οι χρηματοροές της μονάδας με το πάγιο κεφάλαιο. Υπολογίζεται από την εξής σχέση (Μούζα, 2010):

$$POT = \frac{FCI}{\text{καθαρό κέρδος} + e \cdot FCI} = 0,33 \text{ yr} \quad [3.39]$$

Όπου:

e: συντελεστής απόσβεσης (2,782, μαθηματική σταθερά).

Σε αντιστοιχία με τους προηγούμενους δείκτες, θετικό αποτέλεσμα προκύπτει υπολογίζοντας και τον χρόνο εξόφλησης κεφαλαίου (0,33 yr). Η τιμή του συγκεκριμένου δείκτη προδιαθέτει την άμεση έναρξη την εισροής εσόδων στη μονάδα καθώς και το μειωμένο ρίσκο επικινδυνότητας.

## **3.5. Υπολογισμός Περιβαλλοντικών Δεικτών**

Η ανάλυση των περιβαλλοντικών δεικτών του Σεναρίου Ι θα γίνει σε 3 διαφορετικά επίπεδα. Αρχικά, θα υπολογιστεί η συνολική ενέργεια, η οποία καταναλώνεται στη μονάδα παραγωγή ( $E_{EC}$ ). Στη συνέχεια, θα προσδιοριστεί η ποσότητα νερού που καταναλώνεται στις διεργασίες ( $E_{H_2O}$ ), καθώς και το  $CO_2$  το οποίο εξοικονομήθηκε μέσω της μετατροπής του από τη βιομάζα μικροφυκών ( $E_{CO_2}$ ). Τέλος, θα υπολογιστεί ο περιβαλλοντικός δείκτης

Ενεργειακή Απόδοση Επένδυσης (Energy Return On Investment, EROI), ο οποίος εκφράζει τον λόγο του ενεργειακού περιεχομένου των προϊόντων μίας μονάδας προς την ποσότητα της καταναλισκόμενης ενέργειας για την παραγωγή (Hall, 2013).

### Καταναλισκόμενη Ενέργεια

Πρόκειται για το άθροισμα θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας που καταναλώνεται σε κάθε διεργασία της μονάδας. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον Πίνακα 3.12. Η ανάλυση έχει ως αποτέλεσμα τον υπολογισμό της συνολικής καταναλισκόμενης ενέργειας σε 127.055 kWh/yr, καταμετρημένη σε 28.030 kWh/yr ηλεκτρική και 99.019 kWh/yr θερμική ενέργεια. Η κανονικοποίηση της καταναλισκόμενης ενέργειας ως προς τη δυναμικότητα της βιομάζας δίνει τον τελικό δείκτη:  $E_{EC} = 127.055 \text{ kWh/yr}/1.000 \text{ tn/yr} \approx 127,1 \text{ kWh/tn}$ . Η τιμή της καταναλισκόμενης θερμικής ενέργειας είναι αρκετά μεγαλύτερη από αυτήν της καταναλισκόμενης ηλεκτρικής ενέργειας, λόγω των μεγαλύτερων απαιτήσεων σε θέρμανση. Η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας διατηρείται χαμηλή διότι οι συσκευές που την αξιοποιούν είναι περιορισμένες σε αριθμό και ταυτόχρονα έχουν σχετικά μικρές απαιτήσεις. Η τιμή του τελικού δείκτη θεωρείται επίσης σχετικά χαμηλή και διαχειρίσιμη.

**Πίνακας 3.12.** Καταναλισκόμενη ηλεκτρική και θερμική ενέργεια.

| Διεργασία                  | Ηλεκτρική Ενέργεια (kWh/yr) | Θερμική Ενέργεια (kWh/yr) |
|----------------------------|-----------------------------|---------------------------|
| Αντιδραστήρας υδρόλυσης    | 13.680                      | -                         |
| Φυγόκεντροι 1 και 2        | 1.642                       | -                         |
| Υπερδιήθηση                | 3.245                       | -                         |
| Διήθηση μεμβρανών          | 364                         | -                         |
| Ομογενοποιητής             | 2.775                       | -                         |
| Φωτό-βιοαντιδραστήρας      | 6.324                       | 194                       |
| Εναλλάκτης θερμότητας      | -                           | 154                       |
| Μανδύας διήθησης           | -                           | 95.081                    |
| Απόσταξη 1                 | -                           | 3.142                     |
| Απόσταξη 2                 | -                           | 448                       |
| <b>Συνολικές ποσότητες</b> | <b>28.030</b>               | <b>99.019</b>             |

### Νερό και CO<sub>2</sub>

Στη μονάδα παραγωγής καθοριστικό ρόλο διαδραματίζει η συνεισφορά του νερού ως βοηθητική παροχή. Κατά επέκταση, θεωρείται σημαντικό να αναλυθεί το στάδιο εισαγωγής

του νερού στο σύστημα. Επίσης, όσο αποδοτικότερο είναι το στάδιο δέσμευσης και μετατροπής της ποσότητας CO<sub>2</sub>, τόσο πιο φιλική προς το περιβάλλον καθίσταται η μονάδα. Ακολουθώντας τα ισοζύγια μάζας του Σεναρίου Ι, οι ποσότητες νερού και CO<sub>2</sub> που υπολογίστηκαν παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.13.

**Πίνακας 3.13.** Εισερχόμενο νερό και CO<sub>2</sub> που απομακρύνεται.

| Στάδιο Διαγράμματος Ροής<br>(Σχήμα 2.1) | Παροχή Νερού<br>(tn/yr) | Παροχή CO <sub>2</sub><br>(tn/yr) |
|---|-------------------------|-----------------------------------|
| Ρεύμα [1] (απαέρια)                     | 22.114                  | 18.428                            |
| Ρεύμα [7] (απαέρωση PBR)                | -                       | 17.507                            |
| Ρεύμα [6] (προκαλλιέργεια)              | 169                     | -                                 |
| Ρεύμα [8] (θρεπτικά συστατικά)          | 40.189                  | -                                 |

Από τα δεδομένα του Πίνακα 3.13 προκύπτει πως η συνολική ετήσια κατανάλωση φρέσκου νερού στη μονάδα είναι  $22.114 + 169 + 40.189 = 62.472$  tn/yr και η ποσότητα CO<sub>2</sub> που δεσμεύεται από τα κύτταρα των μικροφυκών είναι  $18.428 - 17.507 = 921$  tn/yr. Λαμβάνοντας υπόψη και τη δυναμικότητα της μονάδας κανονικοποιούνται οι δείκτες ως εξής:  $E_{H_2O} = 62.472 \text{ tn/yr} / 1.000 \text{ tn/yr} \approx 62,4$  και  $E_{CO_2} = 921 \text{ tn/yr} / 1.000 \text{ tn/yr} \approx 0,91$ . Το μεγαλύτερο ποσοστό του νερού που εισέρχεται στη μονάδα προέρχεται από το Ρεύμα [8], το οποίο περιλαμβάνει και τα θρεπτικά συστατικά. Προκειμένου να επικρατούν οι βέλτιστες συνθήκες παραγωγής βιομάζας, είναι αναμενόμενο η μονάδα να απαιτεί σημαντική ποσότητα νερού. Επίσης, το μεγαλύτερο ποσοστό της ποσότητας CO<sub>2</sub> που εισέρχεται στην μονάδα παραγωγής, εξέρχεται από το Ρεύμα [7] μέσω της απαέρωσης του φωτό-βιοαντιδραστήρα.

### **Ενεργειακή Απόδοση Επένδυσης (EROI)**

Όπως περιγράφεται και παραπάνω, EROI είναι ο λόγος της ποσότητας της χρησιμοποιήσιμης ενέργειας που λαμβάνεται από έναν πόρο προς την ποσότητα της ενέργειας που δαπανάται για την παραγωγή αυτής της καθαρής ποσότητας ενέργειας. Ως δείκτης είναι καθοριστικός παράγοντας για την περιβαλλοντική αξιολόγηση ενός εγχειρήματος, καθώς μία υψηλή τιμή του σημαίνει ότι η παραγωγή ενέργειας από αυτήν την πηγή είναι σχετικά εύκολη και οικονομικά-ενεργειακά αποδοτική (Hall, 2013). Ωστόσο, όταν η τιμή αυτού του δείκτη είναι μικρή, η ανάκτηση ενέργειας από αυτήν την πηγή είναι δύσκολη και δαπανηρή.

Στην απλούστερη μορφή του, το EROI υπολογίζεται ως ο λόγος του ενεργειακού περιεχομένου των προϊόντων μίας μονάδας προς την κατανάλωση ενέργειας για την παραγωγή της. Στη συγκεκριμένη εργασία, το ενεργειακό περιεχόμενο των τεσσάρων

προϊόντων προκύπτει πολλαπλασιάζοντας το κάθε προϊόν με τον ανάλογο συντελεστή ώστε να μετατραπούν σε kcal οι ποσότητες (πρωτεΐνες: 4, σάκχαρα: 4, λιπίδια: 9, φυκοκυανίνη: 3,2 και υπόλειμμα: 4) (Council Directive, 1990). Έπειτα, γίνεται η μετατροπή από kcal σε kWh/yr (η τελική τιμή προκύπτει ίση με 168.831 kWh/yr). Επιπλέον, η κατανάλωση ενέργειας ως είσοδος στη μονάδα υπολογίστηκε ήδη ίση με το άθροισμα της θερμικής και της ηλεκτρικής ενέργειας (127.055 kWh/yr). Συνεπώς, η τιμή του δείκτη προκύπτει:

$$EROI = \frac{\text{Ενεργειακή παραγωγή}}{\text{Ενεργειακή είσοδος}} = 1,33 \quad [3.40]$$

Ολοκληρώνοντας την οικονομική και περιβαλλοντική ανάλυση του Σεναρίου Ι, τα σχετικά αποτελέσματα συγκεντρώνονται στον Πίνακα 3.14 με σκοπό να χρησιμοποιηθούν για τη σύγκριση με τα υπόλοιπα σενάρια παραγωγής που περιγράφονται στο επόμενο κεφάλαιο.

**Πίνακας 3.14.** Συγκεντρωτικά αποτελέσματα οικονομικής και περιβαλλοντικής ανάλυσης του Σεναρίου Ι (δυναμικότητα 1.000 tn/yr).

| Μέγεθος                              | Σύμβολο          | Τιμή            |
|--------------------------------------|------------------|-----------------|
| Κόστος παγίου κεφαλαίου              | FCI              | 18.314.578 €    |
| Ετήσιο λειτουργικό κόστος            | TPC              | 10.180.232 €/yr |
| Κόστος παραγωγής βιομάζας            | C <sub>CB</sub>  | 9,06 €/kg       |
| Κόστος παραγωγής συνολικών προϊόντων | C <sub>CP</sub>  | 15 €/kg         |
| Ετήσιο καθαρό κέρδος                 | P                | 5.304.294 €/yr  |
| Απόδοση επένδυσης                    | ROI              | 34,4 %          |
| Κέρδος εγχειρήματος                  | V                | 1.884.917 €/yr  |
| Χρόνος εξόφλησης κεφαλαίου           | POT              | 0,33 yr         |
| Καταναλισκόμενη ενέργεια             | E <sub>EC</sub>  | 127,1 kWh/tn    |
| Κατανάλωση νερού                     | E <sub>H2O</sub> | 62,4            |
| Δέσμευση CO <sub>2</sub>             | E <sub>CO2</sub> | 0,91            |
| Ενεργειακή απόδοση επένδυσης         | EROI             | 1,33            |

Τέλος, θα πρέπει να σημειωθεί πως σε όλη την έκταση του Κεφαλαίου 3 χρησιμοποιήθηκαν τιμές, κόστη και αξίες που αφορούν συσκευές, πρώτες ύλες, βοηθητικές παροχές, εργατικά, κλπ., που αρχικά εντοπίστηκαν για διαφορετικές χρονιές. Όλες αυτές οι τιμές τροποποιήθηκαν για να ισχύουν στο έτος 2025 (ως προβλεπόμενη χρονική στιγμή έναρξης κατασκευής της μονάδας), χρησιμοποιώντας κατάλληλους δείκτες, ανάλογα με το είδος της τιμής. Αναλυτικά ο τρόπος προσέγγισης του συγκεκριμένου ζητήματος περιγράφεται στο Παράρτημα της εργασίας.

## Κεφάλαιο 4:

### Ανάλυση Ευαισθησίας και Βελτιστοποίηση

---

#### 4.1. Ανάλυση Αγοράς

Όπως αναφέρθηκε και στα προηγούμενα κεφάλαια, το στέλεχος *Arthrospira* αποτελεί ήδη ένα από τα πιο σημαντικά εμπορικά προϊόντα μικροφυκών. Μάλιστα, τα τελευταία χρόνια βρίσκεται σε συνεχή ανοδική πορεία με βάση τις τάσεις της αγοράς. Οι σχετικές προβλέψεις αναφέρουν ότι η ζήτηση της *Spirulina* θα αυξηθεί τα επόμενα χρόνια κατά περίπου 13,6%, με αποτέλεσμα να φτάσει τους 68.025,2 τόνους (629,6 Μ\$ για το 2025) (Meticulous Market Research, 2020). Μία άλλη μελέτη υποστηρίζει ότι η αγορά της *Spirulina* θα φτάσει τα 968,6 Μ\$ (2028), με ζήτηση τους 98.768,5 τόνους (αύξηση κατά 18,1% από το 2021 έως το 2028) (Meticulous Market Research, 2020). Οι σημαντικότεροι παράγοντες που θα συνεισφέρουν σε αυτό το γεγονός είναι οι αυξανόμενες τάσεις υγείας και ευεξίας, η βιομηχανία συμπληρωμάτων διατροφής, η ζήτηση για φυσικά χρώματα τροφίμων, η χορτοφαγία, η χρήση σε υδατοκαλλιέργειες και η διείσδυση της φυκοκυανίνης σε νέα εμπορικά προϊόντα (Meticulous Market Research, 2020). Ωστόσο, εκτιμάται ότι το τμήμα εφαρμογών φαρμακευτικών προϊόντων θα κατέχει το μεγαλύτερο μερίδιο της συνολικής αγοράς, λόγω της αυξανόμενης ανησυχίας σε διάφορες χώρες για την υγεία του γηραιότερου πληθυσμού, της ισχυρής επιθυμίας για φυσικές εναλλακτικές λύσεις παραδοσιακών φαρμακευτικών προϊόντων και της γενικότερης ευαισθητοποίησης των καταναλωτών σχετικά με τη σχέση διατροφής και υγείας.

Η Βόρεια Αμερική εκτιμάται ότι κατέχει το μεγαλύτερο μερίδιο της αγοράς *Spirulina* το, ακολουθούμενη από την Ασία και την Ευρώπη (Meticulous Market Research, 2020). Το μεγάλο μερίδιο αυτής της περιοχής οφείλεται κυρίως στην τεράστια κατανάλωση συμπληρωμάτων υγείας, στους αυστηρούς κανονισμούς κατά της χρήση συνθετικών χρωμάτων, στην ανάπτυξη θυγατρικών βιομηχανιών για καλλυντικά προϊόντα και βιολογικά λιπάσματα, στην αυξανόμενη προτίμηση για φυσικές πηγές πρωτεΐνης και στην παρουσία βασικών κατασκευαστών *Spirulina* με τεράστιες δυνατότητες παραγωγής.

Αξίζει να τονιστεί πως, σύμφωνα με εμπορικούς οργανισμούς στη βιομηχανία διατροφικών προϊόντων, υπήρξε σημαντικός αντίκτυπος της πανδημίας COVID-19 στην παγκόσμια αλυσίδα εφοδιασμού για λειτουργικά τρόφιμα και συμπληρώματα διατροφής (προμήθεια πρώτων υλών, παραγωγή, συσκευασία και διανομή, εισαγωγές και εξαγωγές), και κατά επέκταση στην κατανάλωση και της *Spirulina* (Meticulous Market Research, 2020). Το φαινόμενο αυτό παρατηρήθηκε κυρίως το πρώτο τρίμηνο του 2020, με πρώτη χώρα την Κίνα, η οποία είναι ένας από τους κορυφαίους παραγωγούς και καταναλωτές *Spirulina*, αλλά επηρέασε ανάλογα και πολλές άλλες χώρες, π.χ., Η.Π.Α., Ινδία, Αυστραλία, Βραζιλία και τις χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Ωστόσο, κατά τη διάρκεια της πανδημίας, η ποιοτική

διατροφή αναδείχθηκε ως η κορυφαία προτεραιότητα του κάθε μεμονωμένου ατόμου, ως το μέσο για να βελτιώσει το ανοσοποιητικό του σύστημα, υποστηρίζοντας την ισχυρή ζήτηση για προϊόντα φυσικών και φυτικών πρωτεϊνών. Για παράδειγμα, οι ανοσοενισχυτικές και αντιικές ιδιότητες της *Spirulina* οδήγησαν -παρά τα εμπόδια στην εφοδιαστική αλυσίδα- στην αύξηση της ζήτησης της κατά το επόμενο χρονικό διάστημα (Meticulous Market Research, 2020).

Πέρα από τα διατροφικά προϊόντα της *Spirulina*, είναι ευρέως γνωστή η αξιοποίηση της βιομάζας μικροφυκών για την παραγωγή προϊόντων με άλλες εφαρμογές, χωρίς σημαντικές προδιαγραφές ασφαλείας. Το σημαντικότερο παράδειγμα αυτής της περίπτωσης είναι η παραγωγή βιοκαυσίμων από τα βιοχημικά συστατικά της βιομάζας (π.χ., παραγωγή βιοντίζελ από τα λιπίδια και βιοαιθανόλης από τους υδατάνθρακες). Γενικά, η αγορά των βιοκαυσίμων είναι τεράστια σε μέγεθος, αλλά παρουσιάζει και ιδιαίτερο ανταγωνισμό λόγω των πολυπληθών τύπων βιομάζας που αξιοποιούνται (π.χ., λιγνοκυτταρίνη, απόβλητα τροφίμων, αγροτικά υπολείμματα, κ.ά.) (Huesemann et al., 2009). Συνεπώς, το αποδεκτό κόστος παραγωγής της βιομάζας είναι πολύ χαμηλό -κάτω του 1 €/kg-, τιμή που είναι συγκρίσιμη με το κόστος παραγωγής προϊόντων όπως σιτηρά, σάκχαρα, λαχανικά, κλπ., και αποτρέπει την άμεση χρήση της βιομάζας μικροφυκών για τη συγκεκριμένη εφαρμογή (Huesemann et al., 2009).

Ο επόμενος εμπορικός κλάδος με τις μικρότερες απαιτήσεις ασφαλείας περιλαμβάνει κυρίως προϊόντα για καλλιέργειες (βιολιπάσματα, βιοδιεγέρτες και βιοπαρασιτοκτόνα), βιοπλαστικά είδη και βασικές πρώτες ύλες για τη βιομηχανία (κυρίως σάκχαρα). Το μέγεθος αυτών των αγορών είναι επίσης σημαντικό, αλλά μία έως δύο τάξεις μεγέθους χαμηλότερο από αυτό των βιοκαυσίμων (Garcia et al., 2012). Αντιστρόφως ανάλογα, η τιμή αγοράς της βιομάζας και συνεπώς το κόστος παραγωγής της σε αυτές τις αγορές είναι μία έως δύο τάξεις μεγέθους υψηλότερες από αυτή των βιοκαυσίμων (κυμαίνεται από 10 έως 100 €/kg). Αυτά τα δεδομένα αξιώνουν τον συγκεκριμένο εμπορικό κλάδο ως μία εξαιρετικά ενδιαφέρουσα αγορά για τα μικροφύκη, λόγω των πιθανών πλεονεκτημάτων ως προς την παραγωγική ικανότητα και τη βιωσιμότητα των σχετικών τεχνολογιών (Garcia et al., 2012).

Στην περίπτωση μέτριων απαιτήσεων ασφαλείας για τις εφαρμογές των μικροφυκών περιλαμβάνονται οι υδατοκαλλιέργειες, οι ζωοτροφές και τα πρόσθετα ζωοτροφών. Το μέγεθος αυτού του κλάδου της αγοράς είναι ανάλογο με το προηγούμενο παράδειγμα. Έτσι, η μοναδική διαφορά είναι οι υψηλότερες απαιτήσεις ως προς την ποιότητα των πρώτων υλών και των τεχνολογιών που θα χρησιμοποιηθούν. Παρόλο που αυτές οι υψηλότερες απαιτήσεις επιφέρουν και υψηλότερο κόστος παραγωγής έχει αποδειχθεί, τουλάχιστον στην περίπτωση των υδατοκαλλιεργειών, ότι τα μικροφύκη έχουν το δυναμικό να πρωταγωνιστήσουν στη συγκεκριμένα αγορά (Fernandez et al., 2019).

Τέλος, ο κλάδος της αγοράς που αφορά τη χρήση προϊόντων μικροφυκών στη διατροφή και υγεία του ανθρώπου είναι ο πιο σύγχρονος κλάδος με το υψηλότερο ενδιαφέρον. Τα προϊόντα αυτά μπορεί να περιλαμβάνουν ολόκληρη τη βιομάζα μικροφυκών για τρόφιμα και θρεπτικά συστατικά ή επιλεγμένα συστατικά υψηλής αξίας (όπως πολυακόρεστα

λιπαρά οξέα, PUFAs) ως αντιοξειδωτικά για καλλυντικές και φαρμακευτικές εφαρμογές (Borowitzka et al., 2013). Σίγουρα, το μέγεθος αυτών των αγορών είναι σημαντικά μικρότερο, αλλά η αξία των προϊόντων είναι υψηλότερη (έως και 1.000 €/kg). Ωστόσο, για την παραγωγή των συστατικών αυτών υψηλής αξίας είναι απαραίτητο να χρησιμοποιούνται πρώτες ύλες και τεχνολογίες υψηλής ποιότητας. Χαρακτηριστικό είναι ότι κατά το παρόν επιτρέπεται η χρήση μόνο συγκεκριμένου αριθμού στελεχών. Συνεπώς, πρόκειται για μία πολύ περιοριστική αγορά, με πολλές κανονιστικές απαιτήσεις και απαιτήσεις ασφάλειας.

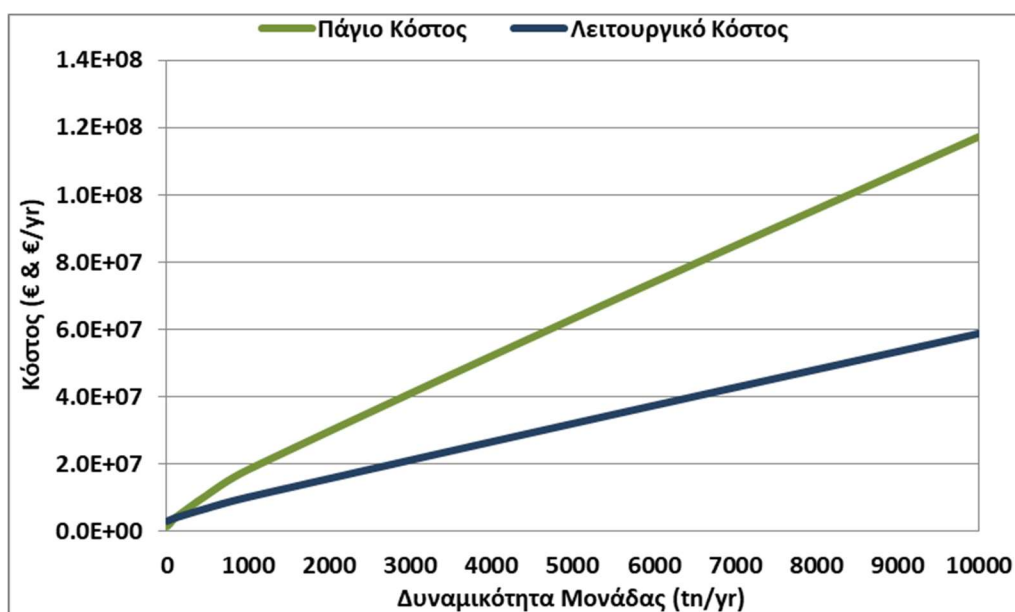
## 4.2. Προσδιορισμός Δυναμικότητας Μονάδας

Στο προηγούμενο κεφάλαιο, με σκοπό να πραγματοποιηθεί μία προκαταρκτική αλλά πλήρης τεχνική, οικονομική και περιβαλλοντική ανάλυση της ολοκληρωμένης μονάδας, χρησιμοποιήθηκε το Σενάριο I που αντιστοιχεί σε δυναμικότητα βιομάζας ίση με 1.000 tη/γρ. Στην παρούσα ενότητα θα διερευνηθεί περαιτέρω η επίδραση της δυναμικότητας στους οικονομικούς δείκτες της μονάδας, με στόχο να εντοπιστεί η περισσότερο ασφαλής περιοχή λειτουργίας του βιοδιυλιστηρίου. Από τη στιγμή που ο σχεδιασμός της μονάδας αποσκοπεί στην παραγωγή τεσσάρων βιοχημικών προϊόντων (σάκχαρα, πρωτεΐνες, λιπίδια και φυκοκυανίνη), αλλά δίνεται έμφαση στην παραγωγή φυκοκυανίνης -ως μία χρωστική ουσία πολύ υψηλής αξίας, αλλά με μικρό μέγεθος αγοράς-, αναμένεται πως η δυναμικότητα θα πρέπει να έχει μία χαμηλή τιμή. Αυτό εξασφαλίζει μικρότερο ρίσκο για τη μονάδα, καθώς όσο μεγαλύτερη ποσότητα φυκοκυανίνης παραχθεί τόσο αυξάνει ο κίνδυνος να μην υπάρχει η ανάλογη ζήτηση από την αγορά. Συνεπώς, σε ότι ακολουθεί θεωρείται ως κεντρικό προϊόν της μονάδας η φυκοκυανίνη, ενώ τα υπόλοιπα προϊόντα ορίζονται ως συμπληρωματικά προϊόντα με υψηλή προστιθέμενη αξία. Σε κάθε περίπτωση όμως, ο ορισμός του βιοδιυλιστηρίου 3<sup>ης</sup> γενιάς επιβάλλει την ταυτόχρονη παραγωγή όλων των βιοχημικών προϊόντων (Liu et al., 2020). Με αυτό τον τρόπο θα ευνοηθεί οι οικονομικός χαρακτήρας της μονάδας.

Ακολουθώντας τη μεθοδολογία του προηγούμενου κεφαλαίου και επιλύοντας διαδοχικά τα ισοζύγια μάζας και ενέργειας, μαζί με τη διαστασιολόγηση όλων των συσκευών, για διαφορετικές τιμές δυναμικότητας, υπολογίζονται οι βασικοί οικονομικοί δείκτες της μονάδας. Θα πρέπει να σημειωθεί πως οι τιμές της δυναμικότητας που εξετάζονται ξεκινούν από ιδιαιτέρως χαμηλές τιμές. Αυτό συμβαίνει για να εντοπιστεί η βέλτιστη περιοχή δυναμικότητας σε όσο το δυνατόν μικρότερες τιμές. Εκτός του ρίσκου διάθεσης των προϊόντων στην αγορά, αυτή η επιλογή αποτρέπει την ανάγκη διαστασιολόγησης συσκευών μεγάλου όγκου. Η πιθανότητα εμφάνισης αυτού του προβλήματος επιδρά περισσότερο από κάθε άλλο στάδιο στον φωτό-βιοαντιδραστήρα, καταλήγοντας σε πολύ υψηλές τιμές απαιτούμενου όγκου για αυτόν και κατά επέκταση σε πολύ υψηλές απαιτήσεις σε διαθέσιμες εκτάσεις για την κατασκευή της μονάδας (Huang et al., 2019).

Στο Σχήμα 4.1 μπορεί να φανεί η επίδραση της δυναμικότητας της μονάδας στο συνολικό πάγιο και λειτουργικό της κόστος, για τιμές δυναμικότητας βιομάζας στο εύρος 10-10.000

tn/yr. Παρατηρείται πως τα δύο κόστη είναι ανάλογα της δυναμικότητας και παρουσιάζουν μία σχεδόν γραμμική εξάρτηση. Όπως είναι λογικό, τόσο το πάγιο όσο και το λειτουργικό κόστος αυξάνουν παράλληλα με τη δυναμικότητα. Επιθυμώντας να διατηρηθούν οι τιμές τους σε χαμηλά σχετικά επίπεδα, μπορεί να βγει το συμπέρασμα πως η επιλεγμένη τιμή των 1.000 tn/yr ικανοποιεί αυτό το κριτήριο. Συγκεκριμένα, για τη συγκεκριμένη δυναμικότητα οι τιμές του παγίου και λειτουργικού κόστους είναι 18.314.578 € και 10.180.232 €/yr, αντίστοιχα. Παρόλα αυτά, οι συγκεκριμένοι οικονομικοί δείκτες δεν θεωρούνται οι πλέον κατάλληλοι για τον εντοπισμό της βέλτιστης λειτουργίας ως προς τη δυναμικότητα βιομάζας.

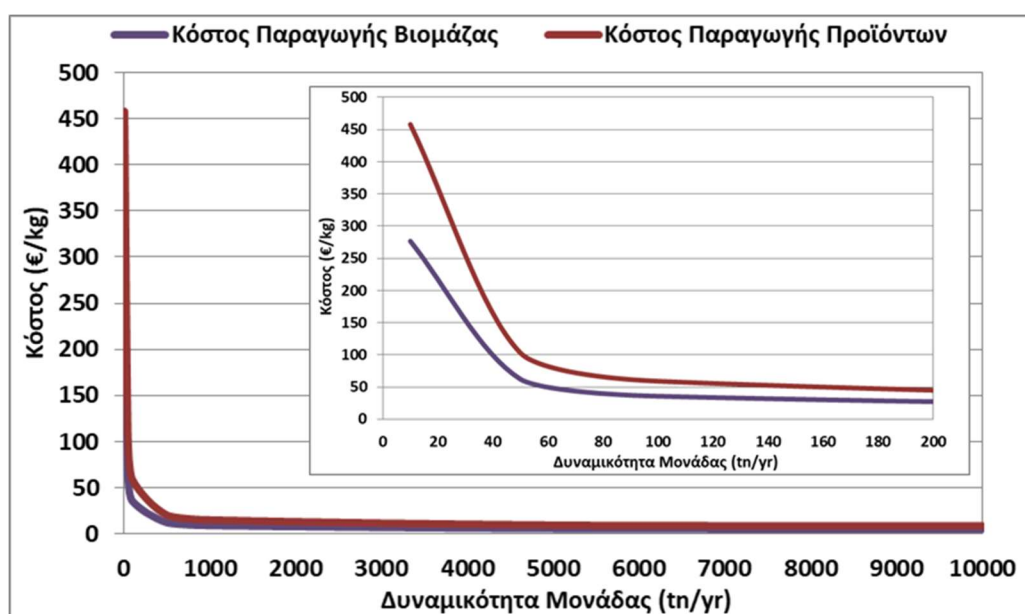


**Σχήμα 4.1.** Επίδραση της δυναμικότητας της μονάδας στο πάγιο και λειτουργικό κόστος.

Στο Σχήμα 4.2 παρουσιάζεται η μεταβολή του κόστους παραγωγής βιομάζας και του κόστους παραγωγής συνολικών προϊόντων συναρτήσει της δυναμικότητας. Στο βασικό διάγραμμα απεικονίζεται όλο το εύρος των τιμών της δυναμικότητας (10-10.000 tn/yr), ενώ στο εσωτερικό διάγραμμα απομονώνεται ένα μικρότερο εύρος τιμών (10-200 tn/yr). Είναι εμφανές από τα δύο διαγράμματα ότι οι κλίσεις των καμπυλών είναι μεγάλες μεταξύ των τιμών δυναμικότητας 10-50 tn/yr και τα δύο κόστη παραγωγής μειώνονται ραγδαία. Για μεγαλύτερες τιμές δυναμικότητας παρατηρείται απότομη μείωση των κλίσεων των καμπυλών, αλλά οι απόλυτες τιμές συνεχίζουν να μειώνονται. Στη συνέχεια οι κλίσεις πρακτικά μηδενίζονται και οι τιμές σχεδόν σταθεροποιούνται, ανεξάρτητα από την περαιτέρω αύξηση της δυναμικότητας. Αυτό σημαίνει πως η επίδραση της δυναμικότητας στα συγκεκριμένα κόστη ελαχιστοποιείται όσο αυξάνει η δυναμικότητα. Το συγκεκριμένο χαρακτηριστικό είναι άκρως επιθυμητό για τη λειτουργία της μονάδας, καθώς κατά τη λειτουργία της σε περιοχή τιμών δυναμικότητας που δεν επηρεάζεται το κόστος παραγωγής, η μονάδα μπορεί να αντιμετωπίσει έστω και μικρές μεταβολές της

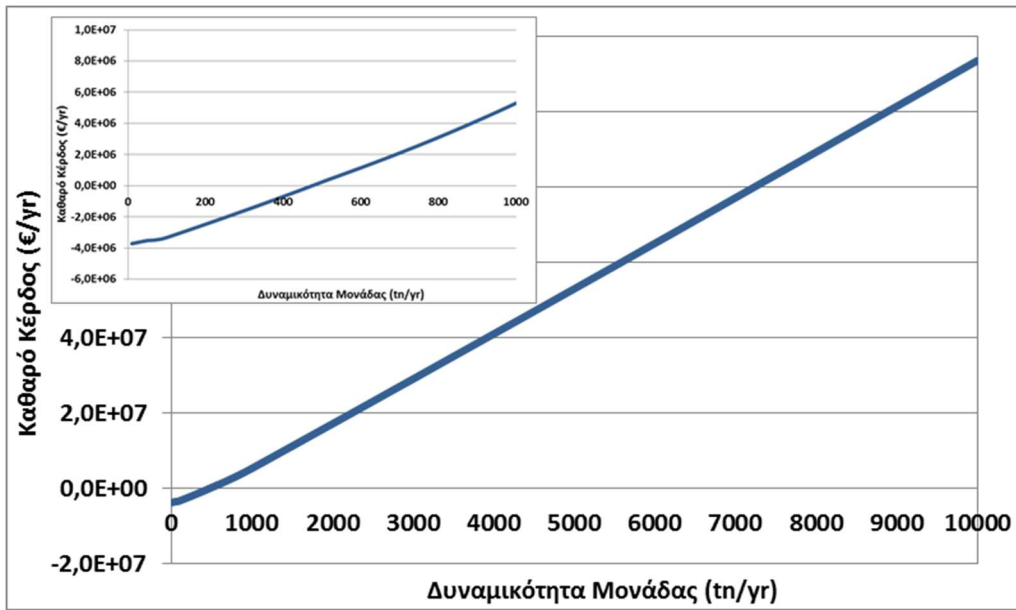


δυναμικότητας. Οι λόγοι που θα μπορούσαν να οδηγήσουν στη διαφοροποίηση της δυναμικότητας μπορεί να είναι εκούσιοι (π.χ., λόγω μεταβολής της ζήτησης της αγοράς στα συγκεκριμένα προϊόντα ή επέκταση της μονάδας) ή ακούσιοι (π.χ., μείωση της απόδοσης των επιμέρους σταδίων παραγωγής ή αστοχία κάποια συσκευής). Η επιλεγμένη τιμή δυναμικότητας για το Σενάριο Ι (1.000 tn/yr) καλύπτει πλήρως τις συγκεκριμένες απαιτήσεις και θεωρείται ασφαλής για τη λειτουργία της μονάδας. Οι τιμές που προκύπτουν από το Σχήμα 4.2 για το κόστος παραγωγής βιομάζας και συνολικών προϊόντων είναι 9,06 €/kg και 15 €/kg, αντίστοιχα.



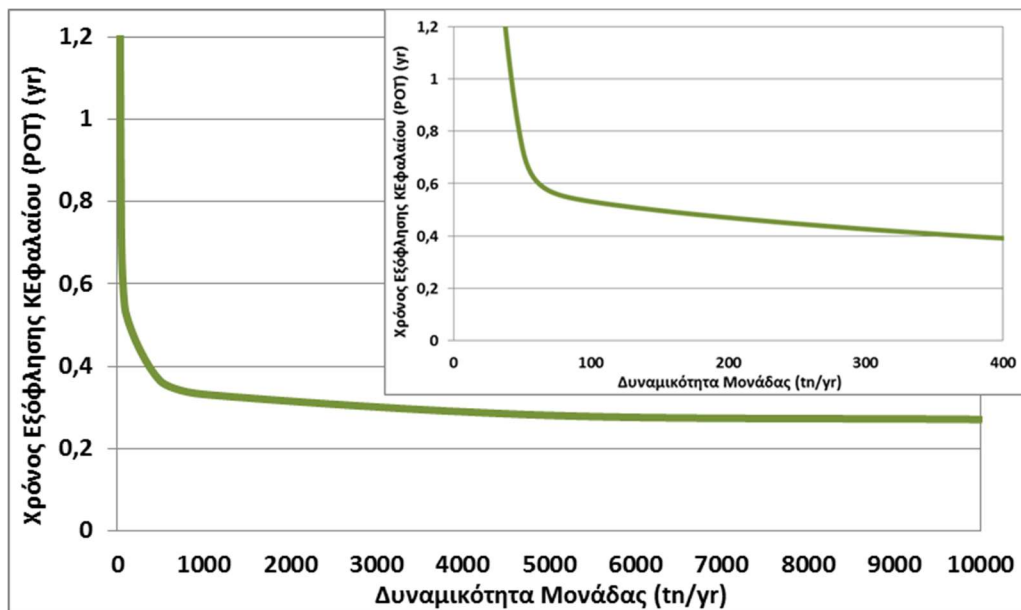
**Σχήμα 4.2.** Επίδραση της δυναμικότητας στο κόστος παραγωγής της βιομάζας και των συνολικών βιοχημικών προϊόντων.

Για να επιβεβαιωθεί η επιλογή της δυναμικότητας στο Σενάριο Ι είναι απαραίτητο να υπολογιστούν και οι οικονομικοί δείκτες που λαμβάνουν υπόψη τα έσοδα της μονάδας. Έτσι, στο Σχήμα 4.3 απεικονίζεται η επίδραση της μεταβολής της δυναμικότητας στο καθαρό κέρδος. Στο βασικό διάγραμμα παρουσιάζεται και πάλι όλο το εύρος μελέτης (10-10.000 tn/yr), ενώ το εσωτερικό διάγραμμα εστιάζει σε μικρότερες τιμές (10-1.000 tn/yr). Παρατηρείται πως αρχικά (για μικρές δυναμικότητες) η τιμή του καθαρού κέρδους είναι αρνητική, ενώ γίνεται θετική όταν η τιμή της δυναμικότητας ξεπερνά περίπου τους 450 tn/yr. Θέτοντας ως κριτήριο το όσο το δυνατό μεγαλύτερο κέρδος, αλλά ταυτόχρονα ικανοποιώντας τους περιορισμούς που αναφέρθηκαν προηγουμένως, μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα πως για τη δυναμικότητα του Σεναρίου Ι (1.000 tn/yr) η τιμή του καθαρού κέρδους (5.304.294 €/yr) είναι ιδιαίτερως ενθαρρυντική. Με τη συγκεκριμένη επιλογή αναμένεται πως οι τιμές και των υπολοίπων οικονομικών δεικτών θα είναι ικανοποιητικές.



**Σχήμα 4.3.** Επίδραση της δυναμικότητας της μονάδας στο καθαρό κέρδος.

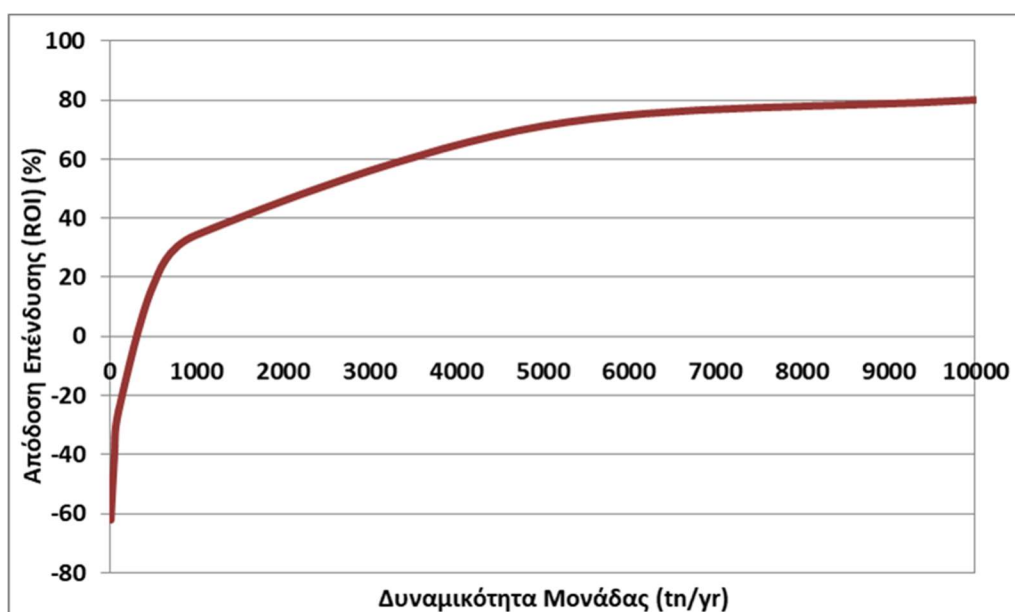
Ένας ακόμη από τους σημαντικούς οικονομικούς δείκτες που δεν ενδείκνυται να επηρεάζεται ισχυρά από τη δυναμικότητα της μονάδας είναι ο χρόνος εξόφλησης κεφαλαίου. Στο Σχήμα 4.4 μπορεί να φανεί η μεταβολή του συγκεκριμένου δείκτη ανάλογα με την τιμή της δυναμικότητας (το βασικό διάγραμμα αντιστοιχεί στο πλήρες εύρος τιμών 10-10.000 tn/gr, ενώ το εσωτερικό σε εύρος 10-400 tn/gr).



**Σχήμα 4.4.** Επίδραση της δυναμικότητας της μονάδας στον χρόνο εξόφλησης κεφαλαίου.

Είναι εμφανές ότι η καμπύλη του χρόνου εξόφλησης κεφαλαίου μειώνεται όσο αυξάνονται οι τιμές δυναμικότητας βιομάζας. Η μορφή της καμπύλης αναλογεί σε πολύ υψηλή κλίση στις χαμηλές τιμές δυναμικότητας, ενώ όσο αυξάνει η δυναμικότητα μειώνεται η κλίση. Η σταθεροποίηση της καμπύλης πραγματοποιείται περίπου στους 1.000 tn/yr, επιβεβαιώνοντας την επιλογή του Σεναρίου Ι. Στη συγκεκριμένη τιμή δυναμικότητας ο χρόνος εξόφλησης κεφαλαίου προκύπτει ίσος με 0,33 yr, τιμή που έχει μειωθεί σε υψηλό βαθμό και θεωρείται πλήρως αποδεκτή για τη μονάδα.

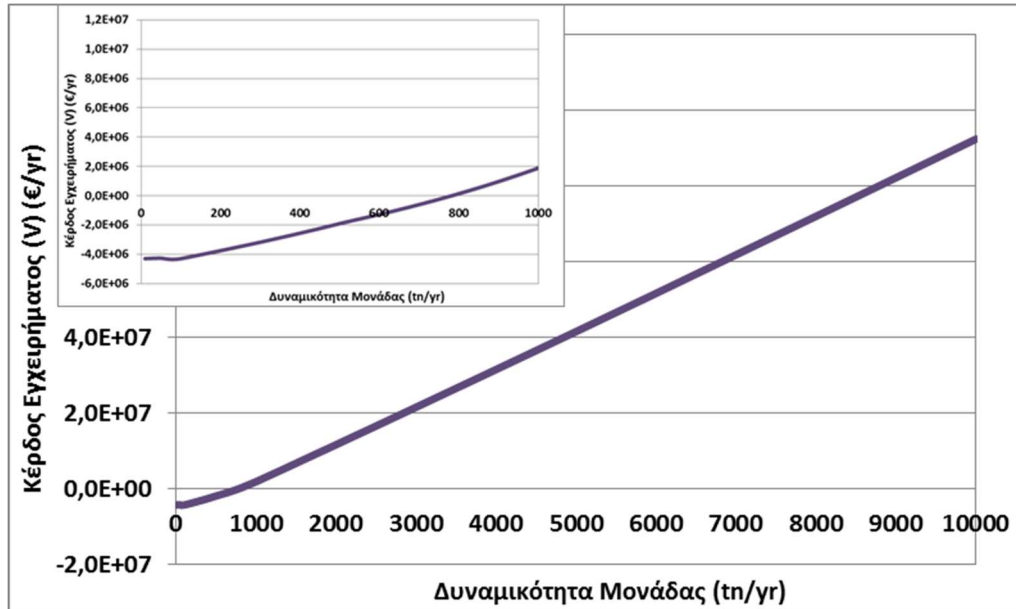
Στη συνέχεια, η μελέτη της δυναμικότητας βιομάζας επεκτείνεται στην επίδραση της στην απόδοση της επένδυσης (Σχήμα 4.5). Βάσει της καμπύλης του συγκεκριμένου διαγράμματος παρατηρείται ότι η απόδοση της επένδυσης λαμβάνει θετικές τιμές όταν η τιμή της δυναμικότητας ξεπεράσει προσεγγιστικά τους 300 tn/yr. Για το Σενάριο Ι, η επιλεγμένη τιμή των 1.000 tn/yr αντιστοιχεί σε τιμή για την απόδοση της επένδυσης ίση με 34,4 %, η οποία είναι προφανώς ισχυρά θετική και άκρως ικανοποιητική για τέτοιου είδους επενδύσεις με υπολογίσιμο ρίσκο.



**Σχήμα 4.5.** Επίδραση της δυναμικότητας της μονάδας στην απόδοση επένδυσης.

Τέλος, η μελέτη της επίδρασης της δυναμικότητας ολοκληρώνεται στο Σχήμα 4.6, όπου σχεδιάζεται η μεταβολή της τιμής του κέρδους εγχειρήματος της επένδυσης βάσει της δυναμικότητας (το βασικό διάγραμμα απεικονίζει το πλήρες εύρος τιμών δυναμικότητας 10-10.000 tn/yr, ενώ το εσωτερικό εστιάζει στο μικρότερο εύρος 10-1.000 tn/yr). Χρησιμοποιώντας τον συγκεκριμένο δείκτη εξασφαλίζεται ότι για θετικές τιμές του καλύπτεται η ελάχιστη αποδεκτή απόδοση κεφαλαίου. Κατά αναλογία, όσο υψηλότερη είναι η τιμή του δείκτη τόσο πιο κερδοφόρα είναι η μονάδα παραγωγής. Γίνεται αντιληπτό από το διάγραμμα ότι το κέρδος εγχειρήματος αποκτά θετικές τιμές για δυναμικότητα

περίπου μεγαλύτερη των 800 tn/yr. Επίσης, όπως αναμενόταν, το κέρδος εγχειρήματος αυξάνει αναλογικά και σχεδόν γραμμικά με τη δυναμικότητα. Στο Σενάριο I (δυναμικότητα 1.000 tn/yr) το κέρδος εγχειρήματος προκύπτει σε μία ισχυρά θετική τιμή, συγκεκριμένα 1.884.917 €/yr.



**Σχήμα 4.6.** Επίδραση της δυναμικότητας της μονάδας στο κέρδος εγχειρήματος.

Σε κάθε περίπτωση οικονομικού δείκτη που μελετήθηκε, προέκυψε πως η επιλογή του Σεναρίου I ικανοποιεί όλες τις προδιαγραφές και τα κριτήρια που τέθηκαν για τη λειτουργία της μονάδας. Είναι σημαντικό πως η δυναμικότητα βιομάζας 1.000 tn/yr εμφανίζει πολύ καλή προοπτική ως προς τα οικονομικά χαρακτηριστικά της μονάδας, ενώ περιορίζει το ρίσκο, θέτοντας το εύρος λειτουργίας στην ασφαλή περιοχή γύρω από αυτή τη δυναμικότητα. Στις επόμενες παραγράφους, η μελέτη θα επεκταθεί και σε περιβαλλοντικούς δείκτες, με σκοπό να αξιολογηθεί και ο περιβαλλοντικός χαρακτήρας της μονάδας παραγωγής.

### 4.3. Σημαντικότερες Παράμετροι

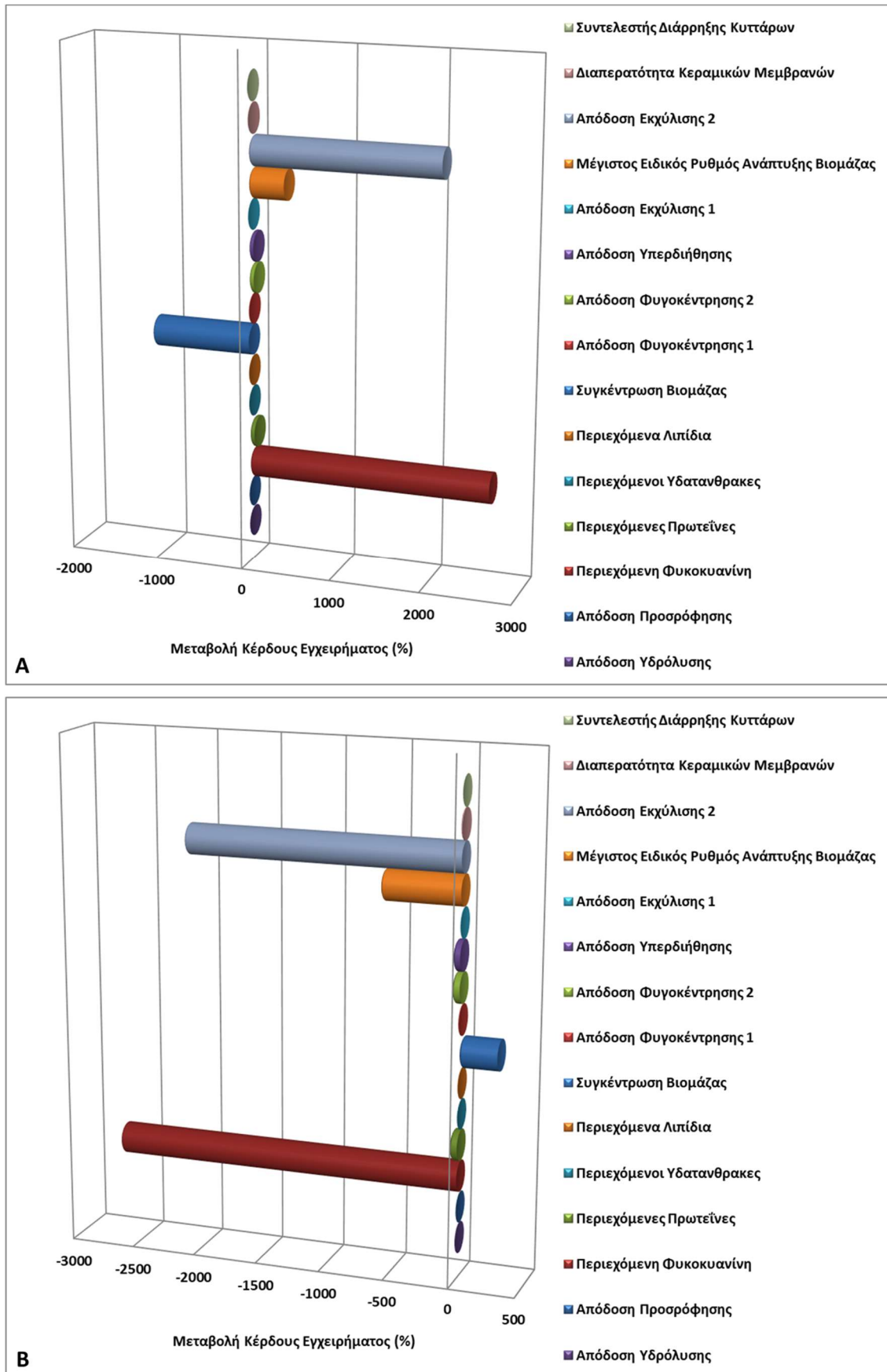
Στην προσπάθεια βελτιστοποίησης του οικονομικού και περιβαλλοντικού αντίκτυπου της μονάδας είναι απαραίτητο να εντοπιστούν οι σημαντικότερες παράμετροι της διεργασίας που εμφανίζουν τη μεγαλύτερη επίδραση. Εκτός της δυναμικότητας ως προς τη βιομάζα, επιλέγεται μία σειρά παραμέτρων που αντιστοιχούν σχεδόν σε όλα τα στάδια του διαγράμματος ροής. Η λίστα των παραμέτρων εμφανίζεται στον Πίνακα 4.1, ενώ ως κριτήριο για τη μελέτη της επίδρασης τους επιλέγεται το κέρδος εγχειρήματος.

Πιο αναλυτικά, ξεκινώντας από τις κεντρικές τιμές των παραμέτρων που αντιστοιχούν στο Σενάριο I (με αυτές πραγματοποιήθηκε ολόκληρη η ανάλυση του προηγούμενου κεφαλαίου) επαναλαμβάνεται η πλήρης ανάλυση για αύξηση και μείωση των τιμών των παραμέτρων κατά 20%, μεταβάλλοντας τις παραμέτρους μία προς μία και κρατώντας τις τιμές των υπολοίπων στην κεντρική του Σεναρίου I (Πίνακας 4.1). Για την ποσοτικοποίηση της επίδρασης υπολογίζεται και καταγράφεται η ποσοστιαία μεταβολή του κέρδους εγχειρήματος. Επομένως, στις περιπτώσεις που το ποσοστό μεταβολής του κέρδους εγχειρήματος είναι μεγάλο, η συγκεκριμένη παράμετρος θεωρείται αυτόματα σημαντική. Η διαδικασία αυτή έλαβε χώρα σε 3 διαφορετικές δυναμικότητες, συγκεκριμένα 800, 1.000 και 1.200 tn/yr (1.000 tn/yr  $\pm$ 20%). Θα πρέπει να σημειωθεί πως στην περίπτωση αύξησης των παραμέτρων κατά 20% και όταν οι τιμές που αντιστοιχούν σε αποδόσεις και περιεκτικότητες ξεπερνούν το 100%, η μέγιστη τιμή ορίζεται ως 100%.

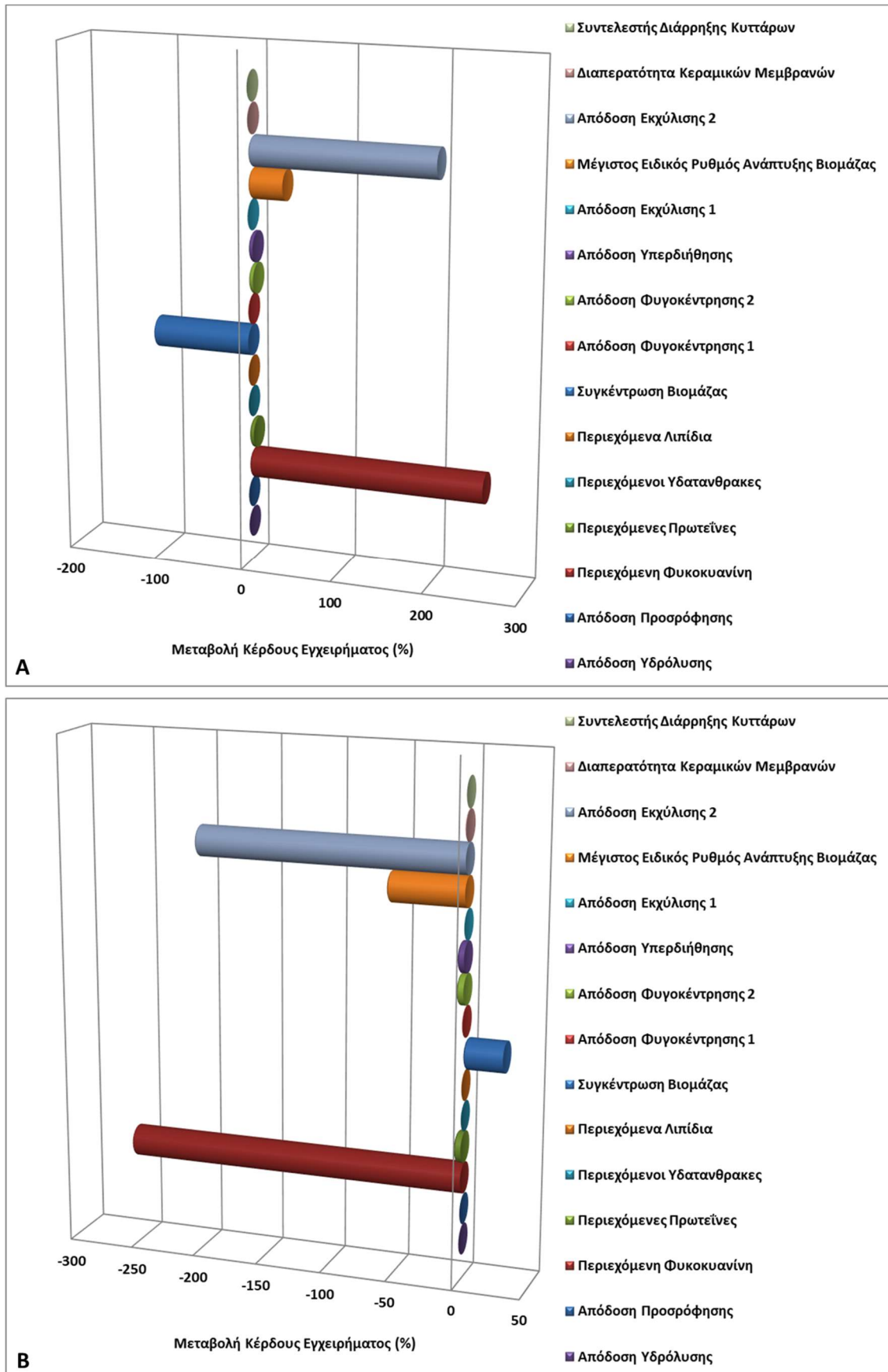
**Πίνακας 4.1.** Επιλεγμένες παράμετροι για την ανάλυση ευαισθησίας.

| Παράμετρος  | Ελάχιστη Τιμή (-20%) | Κεντρική Τιμή (Σενάριο I) | Μέγιστη Τιμή (+20%) |
|---|----------------------|---------------------------|---------------------|
| Δυναμικότητα (tn/yr)  | 800                  | 1.000                     | 1.200               |
| Απόδοση υδρόλυσης (%)   | 46                   | 58                        | 70                  |
| Απόδοση προσρόφησης (%)   | 76                   | 95                        | 100                 |
| Περιεχόμενη φυκοκυανίνη (%)                                     | 3                    | 4                         | 5                   |
| Περιεχόμενες πρωτεΐνες (%)                                      | 40                   | 50                        | 60                  |
| Περιεχόμενοι υδατάνθρακες (%)                                   | 12                   | 15                        | 18                  |
| Περιεχόμενα λιπίδια (%)   | 12                   | 15                        | 18                  |
| Συγκέντρωση βιομάζας (g/l)                                      | 2,4                  | 3                         | 3,6                 |
| Απόδοση φυγοκέντρησης 1 (%)                                     | 64                   | 80                        | 96                  |
| Απόδοση φυγοκέντρησης 2 (%)                                     | 64                   | 80                        | 96                  |
| Απόδοση υπερδιήθησης (%)  | 76                   | 95                        | 100                 |
| Απόδοση εκχύλισης 1 (%)   | 64                   | 80                        | 96                  |
| Απόδοση εκχύλισης 2 (%)   | 69                   | 86                        | 100                 |
| Μέγιστος ειδικός ρυθμός ανάπτυξης βιομάζας (day <sup>-1</sup> ) | 0,28                 | 0,35                      | 0,42                |
| Διαπερατότητα κεραμικών μεμβρανών                               | 0,19                 | 0,24                      | 0,29                |

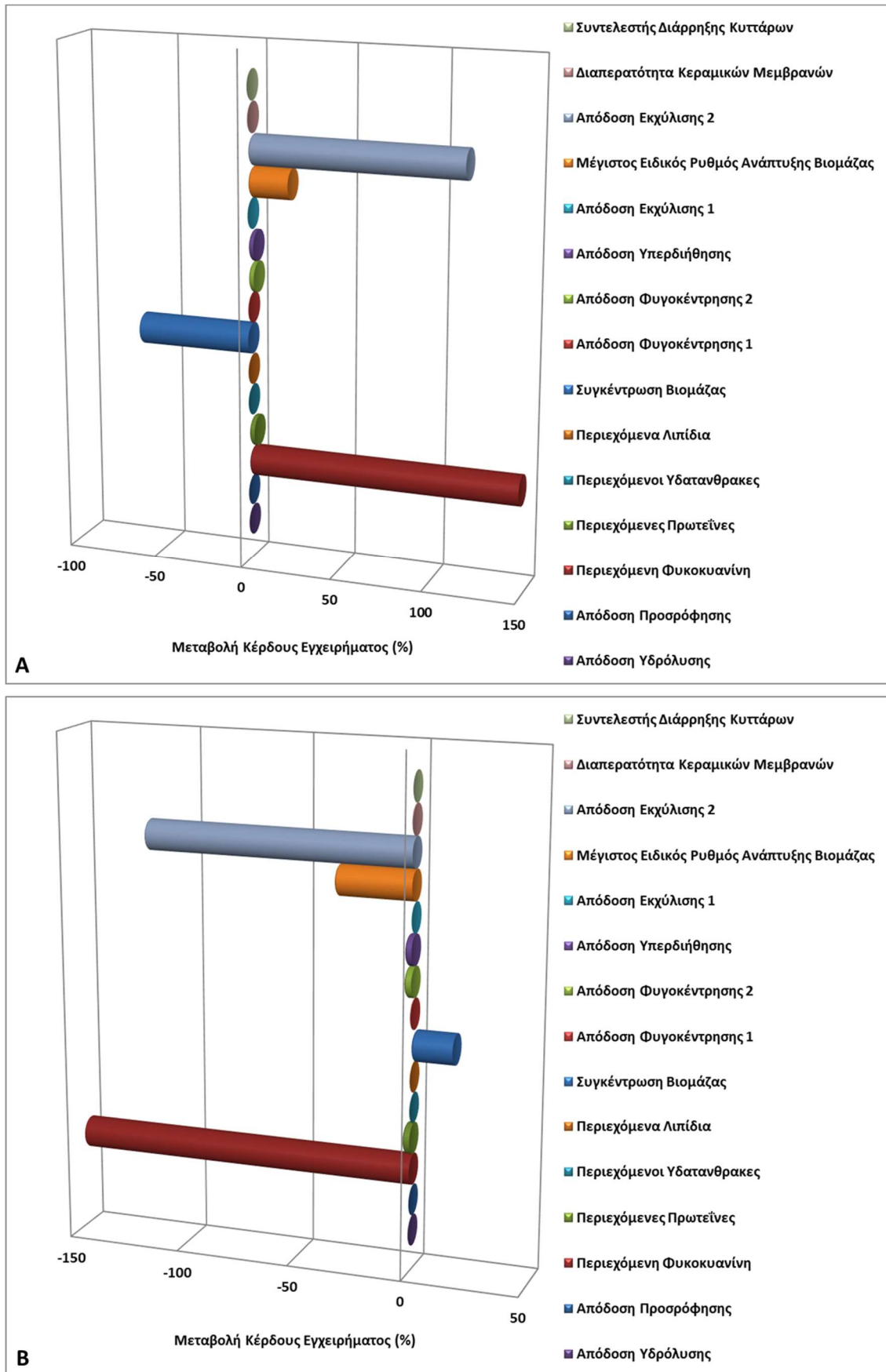
Τα πλήρη αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας παρουσιάζονται στα Σχήματα 4.7, 4.8 και 4.9, αντίστοιχα για τις δυναμικότητες 800, 1.000 και 1.200 tn/yr.



**Σχήμα 4.7.** Ανάλυση ευαισθησίας της επίδραση των σημαντικότερων παραμέτρων στο κέρδος εγχειρήματος για δυναμικότητα 800 tn/yr: (A) αύξηση 20%, (B) μείωση 20%.



**Σχήμα 4.8.** Ανάλυση ευαισθησίας της επίδραση των σημαντικότερων παραμέτρων στο κέρδος εγχειρήματος για δυναμικότητα 1000 tn/yr: (A) αύξηση 20%, (B) μείωση 20%.



**Σχήμα 4.9.** Ανάλυση ευαισθησίας της επίδραση των σημαντικότερων παραμέτρων στο κέρδος εγχειρήματος για δυναμικότητα 1200 tn/yr: (A) αύξηση 20%, (B) μείωση 20%.



Παρατηρείται από τα Σχήματα 4.7, 4.8 και 4.9 ότι οι σημαντικότερες μεταβολές στο κέρδος εγχειρήματος παρουσιάζονται κατά τη μεταβολή του ποσοστιαίου περιεχομένου της φυκοκυανίνης στη βιομάζα, του βαθμού απόδοσης του σταδίου εκχύλισης 2, της συγκέντρωσης της βιομάζας στον φωτό-βιοαντιδραστήρα και του μέγιστου ειδικού ρυθμού ανάπτυξης των κυττάρων της βιομάζας. Είναι αξιοσημείωτο πως από αυτές τις παραμέτρους, η μοναδική που η αύξηση της έχει αρνητική επίδραση στο κέρδος εγχειρήματος είναι η συγκέντρωση της βιομάζας. Αυτό συμβαίνει καθώς η μεγαλύτερη συγκέντρωση βιομάζας, υπό σταθερό περιεχόμενο συνολικών προϊόντων, αυξάνει τον απαιτούμενο όγκο του φωτό-βιοαντιδραστήρα και ταυτόχρονα τις απαιτήσεις όλων των σταδίων επεξεργασίας της βιομάζας. Κατά επέκταση, αυξάνεται και το λειτουργικό κόστος της μονάδας.

Αντίθετα, η αύξηση του περιεχομένου της βιομάζας σε φυκοκυανίνη έχει τη μεγαλύτερη επίδραση στο κέρδος εγχειρήματος. Καθώς η φυκοκυανίνη είναι το πρωτεύον προϊόν της διεργασίας και αυτό με τη μεγαλύτερη εμπορική αξία, οποιαδήποτε αύξηση στην παραγόμενη ποσότητα θα έχει ιδιαίτερα θετική επίδραση στην οικονομικότητα της μονάδας. Αναλογικά, και η αύξηση της απόδοσης του σταδίου εκχύλισης 2, το οποίο αφορά τον διαχωρισμό της φυκοκυανίνης έχει ακριβώς την ίδια θετική επίδραση, καθώς αντιστοιχεί σε μεγαλύτερη ποσότητα ανακτώμενου προϊόντος. Επιπλέον, η αύξηση του μέγιστου ειδικού ρυθμού ανάπτυξης των κυττάρων οδηγεί σε υψηλότερους ρυθμούς παραγωγής βιομάζας και προϊόντων και σε μικρότερες γενικά απαιτήσεις για τον όγκο του φωτό-βιοαντιδραστήρα και τα στάδια επεξεργασίας. Αυτό φέρει ως αποτέλεσμα τη βελτίωση των οικονομικών χαρακτηριστικών της μονάδας.

Ένα ακόμη σημαντικό συμπέρασμα που μπορεί να εξαχθεί από τη μελέτη των τριών διαγραμμάτων είναι πως η επίδραση τους στην τιμή του κέρδους εγχειρήματος μειώνεται όσο αυξάνει η τιμή της δυναμικότητας της μονάδας. Αυτό συμβαίνει λόγω της ίδιας της επίδρασης της δυναμικότητας στα οικονομικά χαρακτηριστικά της μονάδας. Στην προηγούμενη παράγραφο παρατηρήθηκε πως όσο αυξάνει η δυναμικότητα τόσο περισσότερο σταθεροποιούνται οι οικονομικοί δείκτες, άρα και το κέρδος εγχειρήματος. Από την πλευρά όμως των απόλυτων τιμών, η αύξηση της δυναμικότητας οδηγεί σε μεγιστοποίηση της τιμής του κέρδους εγχειρήματος. Επιπλέον, οι μοναδικές παράμετροι που επηρεάζουν σε διαφορετικό βαθμό το κέρδος εγχειρήματος κατά τη μείωση ή την αύξηση τους είναι ο μέγιστος ειδικός ρυθμός ανάπτυξης και η συγκέντρωση της βιομάζας. Αυτό το γεγονός μπορεί να αποδοθεί στα χαρακτηριστικά του φωτό-βιοαντιδραστήρα και συγκεκριμένα στις εξισώσεις σχεδιασμού του, στις οποίες οι δύο αυτές παράμετροι εισέρχονται σε ισχυρά μη γραμμικούς όρους (έστω και αν έχουν απλοποιηθεί) που δεν επηρεάζουν μονοσήμαντα τον σχεδιασμό του PBR.

Όλα τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας συγκεντρώνονται στον Πίνακα 4.2. Για σύγκριση, στον πίνακα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που αφορούν τη μεταβολή των παραμέτρων από το Σενάριο Ι, ενώ οι παράμετροι τοποθετούνται σε σειρά ανάλογα με τη σημαντικότητά τους. Συγκεκριμένα, η σειρά σημαντικότητας των παραμέτρων είναι:

1. Περιεκτικότητα φυκοκυανίνης.
2. Βαθμός απόδοσης εκχύλισης 2.
3. Δυναμικότητα βιομάζας.
4. Συγκέντρωση βιομάζας
5. Μέγιστος ειδικός ρυθμός ανάπτυξης βιομάζας.

Από την παραπάνω λίστα των παραμέτρων προκύπτουν κατά αναλογία και τα σημαντικότερα στάδια της μονάδας, τα οποία είναι ο φωτό-βιοαντιδραστήρας καλλιέργειας μικροφυκών και το δοχείο εκχύλισης της φυκοκυανίνης. Συνεπώς, οποιαδήποτε προσπάθεια τεχνικής βελτιστοποίησης της μονάδας θα πρέπει να επικεντρωθεί στα συγκεκριμένα στάδια. Συγκεκριμένα, μετά από πειραματική μελέτη θα πρέπει να μεγιστοποιηθεί η συσσώρευση φυκοκυανίνης στα κύτταρα μικροφυκών, όταν αυτά αυξάνουν με μέγιστο ρυθμό διπλασιασμού, και να μεγιστοποιηθεί ο βαθμός ανάκτησης της φυκοκυανίνης κατά την εκχύλιση της.

**Πίνακας 4.2.** Ποσοστά μεταβολής του κέρδους εγχειρήματος κατά τη μεταβολή των σημαντικότερων παραμέτρων της ολοκληρωμένης διεργασίας από το Σενάριο Ι.

| Σημαντικότερες Παράμετροι της Διεργασίας   | Ποσοστό Μεταβολής Κέρδους Εγχειρήματος |            |
|--|--|------------|
|  | Μείωση 20%                             | Αύξηση 20% |
| Περιεκτικότητα φυκοκυανίνης                | -256%                                  | +256%      |
| Βαθμός απόδοσης εκχύλισης 2                | -202%                                  | +202%      |
| Δυναμικότητα βιομάζας                      | -107%                                  | +107%      |
| Συγκέντρωση βιομάζας                       | +29%                                   | -108%      |
| Μέγιστος ειδικός ρυθμός ανάπτυξης βιομάζας | -57%                                   | +38%       |

#### 4.4. Προσδιορισμός Βέλτιστων Περιοχών Λειτουργίας

Συνεχίζοντας την ανάλυση της προηγούμενης παραγράφου, μπορεί να πραγματοποιηθεί μία προσπάθεια βελτιστοποίησης της λειτουργίας της μονάδας θέτοντας ως τιμές των πέντε επιλεγμένων ως σημαντικότερων παραμέτρων τις τιμές που αυξάνουν το κέρδος εγχειρήματος. Αναλυτικότερα οι τιμές αυτές είναι:

- Περιεκτικότητα φυκοκυανίνης: 4,8%.
- Βαθμός απόδοσης εκχύλισης 2: 100%.
- Δυναμικότητα βιομάζας: 1.200 tn/yr.
- Μέγιστος ειδικός ρυθμός ανάπτυξης βιομάζας: 0,42 days<sup>-1</sup>.
- Συγκέντρωση βιομάζας: 2,4 g/l.

Οι παραπάνω τιμές ορίζουν το Σενάριο II για τη λειτουργία της μονάδας. Η πλήρης τεχνική, οικονομική και περιβαλλοντική ανάλυση του Σεναρίου II δίνει τα αποτελέσματα που φαίνονται στον Πίνακα 4.3. Στον ίδιο πίνακα καταγράφονται για σύγκριση και τα σχετικά αποτελέσματα του Σεναρίου I.

**Πίνακας 4.3.** Συγκεντρωτικά αποτελέσματα οικονομικής και περιβαλλοντικής ανάλυσης του Σεναρίου II και σύγκριση με το Σενάριο I.

| Μέγεθος                                       | Σενάριο I  | Σενάριο II | Μεταβολή |
|---|------------|------------|----------|
| Ετήσιο λειτουργικό κόστος (TPC, €/yr)         | 10.180.232 | 10.886.923 | +6,9%    |
| Κόστος παγίου κεφαλαίου (FCI, €)              | 18.314.578 | 17.649.338 | -3,6%    |
| Κόστος παραγωγής βιομάζας ( $C_{CB}$ , €/kg)  | 9,06       | 8,07       | -12,3%   |
| Κόστος παραγωγής προϊόντων ( $C_{CP}$ , €/kg) | 15         | 13         | -15%     |
| Ετήσιο καθαρό κέρδος (P, €/yr)                | 5.304.294  | 17.717.336 | +234%    |
| Απόδοση επένδυσης (ROI, %)                    | 34,4       | 78         | +126,7%  |
| Κέρδος εγχειρήματος (V, €/yr)                 | 1.884.917  | 14.292.985 | +658%    |
| Χρόνος εξόφλησης κεφαλαίου (POT, yr)          | 0,33       | 0,27       | -18%     |
| Καταναλισκόμενη ενέργεια ( $E_{EC}$ , kWh/tn) | 127,1      | 177,7      | +40%     |
| Κατανάλωση νερού ( $E_{H2O}$ )                | 62,4       | 82         | +31,4%   |
| Δέσμευση CO <sub>2</sub> ( $E_{CO2}$ )        | 0,91       | 5,5        | +504,3%  |
| Ενεργειακή απόδοση επένδυσης (EROI)           | 1,32       | 0,9        | -31,81%  |

Η αρχική προσπάθεια βελτιστοποίησης της μονάδας, μέσω των επιλεγμένων παραμέτρων και της βελτιστοποίησης των τιμών τους, φαίνεται τουλάχιστον σε θεωρητικό βαθμό επιτυχημένη. Όλοι οι οικονομικοί και περιβαλλοντικοί δείκτες μεταβλήθηκαν προς τιμές που ενισχύουν τον αντίκτυπο της μονάδας στην αγορά και στο περιβάλλον. Καθώς οι σημαντικότερες μεταβολές παρατηρούνται στο κέρδος εγχειρήματος (+658%) και στη δέσμευση CO<sub>2</sub> (+504%), σε σημαντικά υψηλές τιμές, αυτοί οι δύο δείκτες θα χρησιμοποιηθούν παρακάτω για να αποτιμηθούν όλα τα σενάρια βελτιστοποίησης. Θα πρέπει να τονιστεί πως οι ιδιαίτερα μεγάλες αυξήσεις (και οι αντίστοιχες μειώσεις) στους δείκτες οφείλονται στη μικρή δυναμικότητα της μονάδας και κατά επέκταση στη μεγάλη επίδραση που φέρει οποιαδήποτε μικρή μεταβολή των παραμέτρων. Προς το παρόν, για τη λειτουργία της μονάδας η βέλτιστη επιλογή είναι αυτή που ορίζεται από τις παραμέτρους του Σεναρίου II.

#### 4.5. Σενάρια Βελτιστοποίησης

Πλέον του αρχικού σεναρίου βελτιστοποίησης (Σενάριο II), θα αναλυθούν μερικά επιπλέον σενάρια, τα οποία αποσκοπούν στην οικονομική ή/και πειραλλοντική βελτιστοποίηση της μονάδας. Αρχικά, μεγάλο ενδιαφέρον παρουσιάζει η αντικατάσταση στη μονάδα του απλού νερού χρήσης με θαλασσινό νερό (Σενάριο III). Σε αυτήν την περίπτωση η τιμή κόστους του νερού θα μειωθεί κατά 90%, για να ληφθούν υπόψη και πιθανές απώλειες του. Τα αποτελέσματα όσον αφορά τους οικονομικούς και περιβαλλοντικούς δείκτες και η σύγκριση με το Σενάριο I παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.4. Στο Σενάριο III επετεύχθη μία αρκετά μικρότερης τάξης βελτιστοποίηση της μονάδας παραγωγής. Όλοι σχεδόν οι οικονομικοί δείκτες μεταβλήθηκαν σε μικρό βαθμό προς τιμές που ενισχύουν τον αντίκτυπο της μονάδας στην αγορά και στο περιβάλλον. Οι σημαντικότερες μεταβολές σημειώνονται στο κέρδος εγχειρήματος (+3%) και έπειτα στο ετήσιο καθαρό κέρδος (+0,6%). Αυτό συμβαίνει διότι η χρήση του νερού ανήκει στα λειτουργικά κόστη, με αποτέλεσμα καθώς μειώθηκε το κόστος του (λόγω χρήσης θαλασσινού νερού) να αυξηθούν τα κέρδη. Ωστόσο το συγκεκριμένο σενάριο δεν φαίνεται να είναι το πιο βέλτιστο.

**Πίνακας 4.4.** Συγκεντρωτικά αποτελέσματα οικονομικής και περιβαλλοντικής ανάλυσης του Σεναρίου III και σύγκριση με το Σενάριο I.

| Μέγεθος                                       | Σενάριο I  | Σενάριο III | Μεταβολή |
|---|------------|-------------|----------|
| Ετήσιο λειτουργικό κόστος (TPC, €/yr)         | 10.180.232 | 10.151.474  | -0,28%   |
| Κόστος παγίου κεφαλαίου (FCI, €)              | 18.314.578 | 18.314.578  | 0%       |
| Κόστος παραγωγής βιομάζας ( $C_{CB}$ , €/kg)  | 9,06       | 9,03        | -0,33%   |
| Κόστος παραγωγής προϊόντων ( $C_{CP}$ , €/kg) | 15         | 14,97       | -0,2%    |
| Ετήσιο καθαρό κέρδος (P, €/yr)                | 5.304.294  | 5.338.516   | +0,6%    |
| Απόδοση επένδυσης (ROI, %)                    | 34,4       | 34,5        | +0,3%    |
| Κέρδος εγχειρήματος (V, €/yr)                 | 1.884.917  | 1.922.589   | +3%      |
| Χρόνος εξόφλησης κεφαλαίου (POT, yr)          | 0,33       | 0,33        | -        |
| Καταναλισκόμενη ενέργεια ( $E_{EC}$ , kWh/tn) | 127,1      | 127,1       | -        |
| Κατανάλωση νερού ( $E_{H_2O}$ )               | 62,4       | 62,4        | -        |
| Δέσμευση CO <sub>2</sub> ( $E_{CO_2}$ )       | 0,91       | 0,91        | -        |
| Ενεργειακή απόδοση επένδυσης (EROI)           | 1,32       | 1,32        | -        |

Επιπλέον, θα διερευνηθεί και το Σενάριο IV, το οποίο αφορά την ενεργειακή ολοκλήρωση της μονάδας μέσω της αξιοποίησης του υπολείμματος. Συγκεκριμένα, το Ρεύμα [30] που περιλαμβάνει το υπόλειμμα της μονάδας παραγωγής εισέρχεται σε ένα βιοαντιδραστήρα

αναερόβιας χώνευσης. Αποτέλεσμα είναι η μετατροπή της ποσότητας του υπολείμματος σε ενέργεια (θερμική και ηλεκτρική), η οποία θα καλύψει μέρος των ενεργειακών απαιτήσεων της μονάδας. Για να συμβεί αυτό, προσδιορίστηκε βιβλιογραφικά η ποσότητα θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας που εξοικονομείται σε τέτοιου είδους εγκαταστάσεις (Engler et al., 2003). Υπολογίστηκε έτσι ότι μέσω του υπολείμματος μπορούν να εξοικονομηθούν 319.494 kWh/yr ηλεκτρικής ενέργειας και 461.434 kWh/yr θερμικής ενέργειας, τιμές που αντιστοιχούν σε 19.169 €/yr ηλεκτρικής ενέργειας και 13.843 €/yr θερμικής ενέργειας. Για να είναι ρεαλιστικό το συγκεκριμένο σενάριο, θα πρέπει από τα κέρδη να αφαιρεθεί το λειτουργικό κόστος της αναερόβιας χώνευσης (προσδιορίστηκε ίσο με 23.911 €/yr). Τα αποτελέσματα όσον αφορά τους οικονομικούς και περιβαλλοντικούς δείκτες του Σεναρίου IV και η σύγκριση με το Σενάριο I παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.5. Σε αυτό το σενάριο σημειώθηκε μία ιδιαίτερα ελπιδοφόρα περιβαλλοντική βελτιστοποίηση της μονάδας. Οι περισσότεροι οικονομικοί και περιβαλλοντικοί δείκτες μεταβλήθηκαν προς τιμές που ενισχύουν τον οικονομικό και περιβαλλοντικό αντίκτυπο της μονάδας. Οι σημαντικότερες μεταβολές παρατηρούνται στην ενεργειακή απόδοση της επένδυσης (+233,3%) και στην καταναλισκόμενη ενέργεια (-70,2%). Οι μεταβολές αυτές είναι απολύτως λογικές, διότι μέσω της προσθήκης του βιοαντιδραστήρα αναερόβιας χώνευσης καλύπτεται ένα μεγάλο μέρος των ενεργειακών απαιτήσεων της μονάδας (μετατρέποντας την ποσότητα του υπολείμματος σε ενέργεια). Αποτέλεσμα είναι ένα άκρως ελπιδοφόρο σενάριο όσον αφορά την ενεργειακή και περιβαλλοντική βελτιστοποίηση της ολοκληρωμένης μονάδας.

**Πίνακας 4.5.** Συγκεντρωτικά αποτελέσματα οικονομικής και περιβαλλοντικής ανάλυσης του Σεναρίου IV και σύγκριση με το Σενάριο I.

| Μέγεθος                                       | Σενάριο I  | Σενάριο IV | Μεταβολή |
|---|------------|------------|----------|
| Ετήσιο λειτουργικό κόστος (TPC, €/yr)         | 10.180.232 | 10.163.868 | -0,16%   |
| Κόστος παγίου κεφαλαίου (FCI, €)              | 18.314.578 | 18.314.578 | -        |
| Κόστος παραγωγής βιομάζας ( $C_{CB}$ , €/kg)  | 9,06       | 9,05       | -0,11%   |
| Κόστος παραγωγής προϊόντων ( $C_{CP}$ , €/kg) | 15         | 14,98      | -0,13%   |
| Ετήσιο καθαρό κέρδος (P, €/yr)                | 5.304.294  | 5.323.767  | +0,36%   |
| Απόδοση επένδυσης (ROI, %)                    | 34,4       | 34,5       | +0,3%    |
| Κέρδος εγχειρήματος (V, €/yr)                 | 1.884.917  | 1.906.353  | +1,14%   |
| Χρόνος εξόφλησης κεφαλαίου (POT, yr)          | 0,33       | 0,33       | -        |
| Καταναλισκόμενη ενέργεια ( $E_{EC}$ , kWh/tn) | 127,1      | 37,9       | -70,2%   |
| Κατανάλωση νερού ( $E_{H_2O}$ )               | 62,4       | 62,4       | -        |
| Δέσμευση CO <sub>2</sub> ( $E_{CO_2}$ )       | 0,91       | 0,91       | -        |
| Ενεργειακή απόδοση επένδυσης (EROI)           | 1,32       | 4,4        | +233,3%  |

Από τη σύγκριση των Σεναρίων II, III και IV είναι έκδηλο πως η ιδανικότερη περίπτωση -ως μεμονωμένο σενάριο- προκειμένου να επιτευχθεί η ζητούμενη βελτιστοποίηση της μονάδας παραγωγής είναι το Σενάριο II. Ενδεικτικά, η αύξηση του κέρδους εγχειρήματος (+658%) είναι πολύ υψηλή για τη μονάδα και οδηγεί στην οικονομική ενίσχυση της λειτουργίας της. Παράλληλα, η αύξηση της δέσμευσης CO<sub>2</sub> (+504%) έχει ανάλογη επίδραση και στον περιβαλλοντικό χαρακτήρα της μονάδας. Καθώς όμως και τα άλλα δύο σενάρια βελτιστοποίησης είχαν έστω και σε μικρότερο βαθμό θετική επίδραση στη μονάδα, αξίζει να διερευνηθεί ένα πρόσθετο σενάριο (Σενάριο V) που θα περιλαμβάνει συνδυαστικά όλες τις μετατροπές των μεταβλητών που έλαβαν χώρα στα προηγούμενα τρία σενάρια. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης των οικονομικών και περιβαλλοντικών δεικτών του Σεναρίου V και η σύγκριση με το Σενάριο I παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.6.

**Πίνακας 4.6.** Συγκεντρωτικά αποτελέσματα οικονομικής και περιβαλλοντικής ανάλυσης του Σεναρίου V και σύγκριση με το Σενάριο I.

| Μέγεθος   | Σενάριο I  | Σενάριο V  | Μεταβολή |
|---|------------|------------|----------|
| Ετήσιο λειτουργικό κόστος (TPC, €/yr)               | 10.180.232 | 10.833.701 | +6,4%    |
| Κόστος παγίου κεφαλαίου (FCI, €)                    | 18.314.578 | 17.649.338 | -3,6%    |
| Κόστος παραγωγής βιομάζας (C <sub>CB</sub> , €/kg)  | 9,06       | 8,03       | -11,4%   |
| Κόστος παραγωγής προϊόντων (C <sub>CP</sub> , €/kg) | 15         | 13         | -13,3%   |
| Ετήσιο καθαρό κέρδος (P, €/yr)                      | 5.304.294  | 17.780.669 | +235,2%  |
| Απόδοση επένδυσης (ROI, %)                          | 34,4       | 78,3       | +127,6%  |
| Κέρδος εγχειρήματος (V, €/yr)                       | 1.884.917  | 14.362.705 | +662%    |
| Χρόνος εξόφλησης κεφαλαίου (POT, yr)                | 0,33       | 0,27       | -22,2%   |
| Καταναλισκόμενη ενέργεια (E <sub>EC</sub> , kWh/tn) | 127,1      | 88,5       | -30,4%   |
| Κατανάλωση νερού (E <sub>H2O</sub> )                | 62,4       | 82         | +31,4%   |
| Δέσμευση CO <sub>2</sub> (E <sub>CO2</sub> )        | 0,91       | 5,5        | +503,4%  |
| Ενεργειακή απόδοση επένδυσης (EROI)                 | 1,32       | 2          | +51,5%   |

Κατά αναλογία με τα προηγούμενα σενάρια βελτιστοποίησης, όλοι οι οικονομικοί και περιβαλλοντικοί δείκτες του Πίνακα 4.6 αυξήθηκαν ή μειώθηκαν προς περιοχές τιμών που φανερώνουν την οικονομικά και περιβαλλοντικά αειφόρο λειτουργία του βιοδιυλιστηρίου. Επικεντρώνοντας το ενδιαφέρον στο κέρδος εγχειρήματος (+662%) και στη δέσμευση CO<sub>2</sub> (+503,4%) παρατηρείται ότι ο βαθμός βελτιστοποίησης είναι συγκρίσιμος με το Σενάριο II και μάλιστα ελαφρώς ενισχυμένος.

Το τελικό συμπέρασμα που προκύπτει είναι πως για τη λειτουργία της μονάδας η βέλτιστη επιλογή είναι αυτή που ορίζεται από τις παραμέτρους του Σεναρίου V.

## Κεφάλαιο 5:

### Συμπεράσματα και Προτάσεις

---

Στο πλαίσιο της σύγχρονης αναζήτησης εναλλακτικών (οικονομικά ελκυστικών και περιβαλλοντικά φιλικών) πρώτων υλών, η βιομάζα μικροφυκών έχει αποκτήσει τα τελευταία χρόνια σημαντικό ερευνητικό και βιομηχανικό ενδιαφέρον. Συγκεκριμένα, τα μικροφύκη παρουσιάζουν πολύ ιδιαίτερα και επιθυμητά πλεονεκτήματα, όπως είναι ο υψηλός ρυθμός και η ευκολία ανάπτυξης τους, η μεγάλη ποικιλία προϊόντων που μπορούν να παράγουν, η πιθανότητα δέσμευσης σημαντικών ποσοτήτων CO<sub>2</sub> και το μεγάλο εύρος εμπορικών προϊόντων που μπορούν να συνθέσουν.

Από την άλλη πλευρά, η πλήρης αξιοποίηση της βιομάζας μικροφυκών δεν έχει επιτευχθεί ακόμη σε βιομηχανικό επίπεδο. Οι περιορισμοί της συγκεκριμένης τεχνολογίας ορίζουν συγκεκριμένα ερωτήματα που πρέπει να απαντηθούν. Είναι πραγματικά βιώσιμη μία τέτοια μονάδα παραγωγής; Θα μπορούσε να καταστεί ως μία καινοτόμα ιδέα που θα αποφέρει κερδοφορία; Πρόκειται για μία όντως φιλική προς το περιβάλλον πρόταση; Υπό τους συγκεκριμένους άξονες έρευνας, η παρούσα εργασία προσπάθησε να απαντήσει στα παραπάνω ερωτήματα, μέσω της πλήρους τεχνικής, οικονομικής και περιβαλλοντικής ανάλυσης μίας ολοκληρωμένης μονάδας μικροφυκών.

Ο σχεδιασμός της μονάδας πραγματοποιήθηκε υπό την έννοια του βιοδιυλιστηρίου 3<sup>ης</sup> γενιάς, ως η περισσότερο υποσχόμενη σύγχρονη πρακτική. Σύμφωνα με αυτήν την πρακτική, η αξιοποίηση όλων των διαθέσιμων συστατικών της βιομάζας μικροφυκών προς την παραγωγή πολλαπλών προϊόντων υψηλής προστιθέμενης αξίας είναι αυστηρή προϋπόθεση. Συγκεκριμένα, δόθηκε έμφαση στη μελέτη των σταδίων καλλιέργειας μικροφυκών, παραγωγής και επεξεργασίας της βιομάζας και διαχωρισμού και καθαρισμού τεσσάρων προϊόντων: σάκχαρα, πρωτεΐνες, λιπίδια και φυκοκυανίνη. Επιπλέον, ο αειφόρος χαρακτήρας της μονάδας ενισχύεται από τη σύνδεση της τροφοδοσίας της με το ρεύμα των απαερίων μίας μονάδας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, με σκοπό τη δέσμευση και μετατροπή σημαντικών ποσοτήτων CO<sub>2</sub>. Ακόμη, ως δεδομένο της μελέτης ορίστηκε η αξιοποίηση ενός ήδη εμπορικά γνωστού και ιδιαίτερος υποσχόμενου στελέχους μικροφυκών, του *Arthrospira (Spirulina)*.

Το πρώτο ζητούμενο της ανάλυσης αποτέλεσε ο σχεδιασμός του όσο πιο αναλυτικού διαγράμματος ροής της ολοκληρωμένης μονάδας, αποτελούμενου από επτά διακριτά στάδια: (1) προεπεξεργασία αέριων ρύπων, (2) καλλιέργεια μικροφυκών και παραγωγή βιομάζας, (3) αφυδάτωση βιομάζας, (4) παραγωγή και διαχωρισμός σακχάρων, (5) ανάκτηση και καθαρισμός πρωτεϊνών, (6) εκχύλιση και καθαρισμός λιπιδίων, και (7) εκχύλιση και καθαρισμός φυκοκυανίνης. Από αυτά τα στάδια, το πιο απαιτητικό ως προς την προσομοίωση του ήταν το δεύτερο, λόγω της λειτουργίας του κλειστού αυλωτού φωτό-

βιοαντιδραστήρα που είναι εν γένει ένα πολυπαραμετρικό και πολύπλοκο σύστημα. Για να μπορεί να πραγματοποιηθεί η μελέτη είναι απαραίτητο σε κάθε σενάριο λειτουργίας να επιλύονται τα αναλυτικά ισοζύγια μάζας και ενέργειας του διαγράμματος ροής, να διαστασιολογούνται όλες οι συσκευές και να προκύπτουν οι ανάγκες σε πρώτες ύλες, βοηθητικές παροχές και ανθρώπινο δυναμικό.

Γενικά, από την αρχή του σχεδιασμού της μονάδας δόθηκε έμφαση στην παραγωγή φυκοκυανίνης, καθώς αυτή έχει τη μεγαλύτερη εμπορική αξία, παρά το μικρό μέγεθος αγοράς που παρουσιάζει. Αποδείχθηκε έτσι πως η λειτουργία της μονάδας μπορεί να περιοριστεί σε μικρές τιμές δυναμικότητας βιομάζας, εξασφαλίζοντας έτσι μικρό ρίσκο. Αποτέλεσμα αυτού είναι τα υπόλοιπα βιοπροϊόντα να θεωρούνται περισσότερο ως συμπληρωματικά, ακολουθώντας τις προδιαγραφές του βιοδιυλιστηρίου 3<sup>ης</sup> γενιάς και βελτιώνοντας τον οικονομικό χαρακτήρα της μονάδας.

Για να εντοπιστεί το ιδανικό εύρος λειτουργίας ως προς τη δυναμικότητα βιομάζας, μελετήθηκε η επίδραση της σε επιλεγμένους οικονομικούς δείκτες, όπως το πάγιο και λειτουργικό κόστος, το κόστος παραγωγής βιομάζας και συνολικών προϊόντων, ο χρόνος εξόφλησης κεφαλαίου, η απόδοση επένδυσης και το κέρδος εγχειρήματος. Βρέθηκε πως μία δυναμικότητα βιομάζας ίση με 1.000 tn/yr είναι ελπιδοφόρα, καθώς όλοι οι δείκτες έχουν αποδεκτές τιμές, ενώ η μονάδα φαίνεται να επηρεάζεται σε περιορισμένο βαθμό από αλλαγές στην τιμή της. Το συγκεκριμένο χαρακτηριστικό είναι άκρως επιθυμητό, εφόσον η μονάδα μπορεί να αντιμετωπίσει αποτελεσματικά έστω και μικρές μεταβολές της δυναμικότητας, ενώ όλες οι τεχνικές προδιαγραφές και τα οικονομικά κριτήρια που τέθηκαν για τη λειτουργία της μονάδας ικανοποιούνται πλήρως. Συνεπώς, σε τέτοιου είδους τεχνολογίες, είναι πολύ σημαντικό η δυναμικότητα να επιφέρει θετικό αποτέλεσμα ως προς τα οικονομικά χαρακτηριστικά της μονάδας, ενώ ταυτόχρονα να περιορίζει το ρίσκο ορίζοντας μία ασφαλή περιοχή λειτουργίας. Η συγκεκριμένη ανάλυση επεκτάθηκε και στη μελέτη της επίδρασης της δυναμικότητας στους περιβαλλοντικούς δείκτες της μονάδας, με τα αποτελέσματα να είναι επίσης ενθαρρυντικά στο επιλεγμένο εύρος τιμών. Πιο αναλυτικά, η κατανάλωση ενέργειας και φρέσκου νερού, η δέσμευση CO<sub>2</sub> και η ενεργειακή απόδοση της μονάδας -ως οι επιλεγμένοι περιβαλλοντικοί δείκτες- είχαν τιμές που αξιολογούν θετικά το συγκεκριμένο εγχείρημα.

Στο επόμενο στάδιο, με στόχο τη διάκριση των σημαντικότερων παραμέτρων της ολοκληρωμένης διεργασίας, πραγματοποιήθηκε ανάλυση ευαισθησίας θέτοντας ως αντικείμενο βελτιστοποίησης το κέρδος εγχειρήματος. Εντοπίστηκε πως οι σημαντικότερες κατά σειρά παράμετροι είναι: (1) το ποσοστιαίο περιεχόμενο της φυκοκυανίνης στη βιομάζα, (2) ο βαθμός απόδοσης του σταδίου εκχύλισης της φυκοκυανίνης, (3) η δυναμικότητα της μονάδας σε βιομάζα, (4) η συγκέντρωση της βιομάζας στον φωτό-βιοαντιδραστήρα, και (5) ο μέγιστος ειδικός ρυθμός ανάπτυξης των κυττάρων μικροφυκών. Κατά προτεραιότητα, η μεγιστοποίηση του περιεχομένου της βιομάζας σε φυκοκυανίνη φέρει την ισχυρότερη αύξηση στο κέρδος εγχειρήματος. Αναλογικά, και η μεγιστοποίηση της απόδοσης του σταδίου εκχύλισης της, έχει ακριβώς την ίδια θετική επίδραση.



Με βάση τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας πραγματοποιήθηκε η επιθυμητή βελτιστοποίηση της λειτουργίας της μονάδας. Επιπλέον, εντοπίστηκαν και οι πιο σημαντικές διεργασίες της μονάδας, συγκεκριμένα ο φωτό-βιοαντιδραστήρας παραγωγής βιομάζας μικροφυκών και το δοχείο εκχύλισης της φυκοκυανίνης. Αυτές οι διεργασίες ορίζουν και τους διακριτούς στόχους ενίσχυσης της πολιτικής λειτουργίας τους. Σκοπός οποιασδήποτε πειραματικής ή θεωρητικής μελέτης θα πρέπει να είναι η αύξηση της συσσώρευσης φυκοκυανίνης στα κύτταρα μικροφυκών (ενάντια στα τρία άλλα βιοχημικά προϊόντα), όταν αυτά πολλαπλασιάζονται με μέγιστο ρυθμό, και η αύξηση του βαθμού ανάκτησης της φυκοκυανίνης κατά τη διεργασία εκχύλισης. Περαιτέρω του οικονομικού αντίκτυπου, η βελτιστοποίηση των λειτουργικών παραμέτρων επιφέρει και σημαντικά περιβαλλοντικά οφέλη, όπως αυτά αντικατοπτρίζονται στη μεγάλη αύξηση της τιμής στη δέσμευση CO<sub>2</sub>.

Για να ενισχυθεί ακόμη περισσότερο ο αειφόρος χαρακτήρας του υπό μελέτη βιοδιυλιστηρίου 3<sup>ης</sup> γενιάς, μελετήθηκαν επιπλέον σενάρια λειτουργίας που αντιστοιχούν στην αξιοποίηση στη μονάδα αποκλειστικά θαλασσινού (όχι φρέσκου) νερού και στην αξιοποίηση του υπολείμματος της μονάδας σε μία διεργασία αναερόβιας χώνευσης. Με την τελευταία δράση εξασφαλίζεται η ταυτόχρονη παραγωγή ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας σε τέτοιες ποσότητες που καλύπτουν τις ανάγκες της μονάδας μέσω της ενεργειακής ολοκλήρωσης της. Όπως είναι αναμενόμενο, τα σενάρια αυτά βελτιώνουν ακόμη περισσότερο (αλλά σε μικρότερο βαθμό συγκριτικά με το αρχικό σενάριο βελτιστοποίησης) τις τιμές των οικονομικών και περιβαλλοντικών δεικτών.

Η τελική προσπάθεια βελτιστοποίησης της μονάδας, μέσω των τριών προηγούμενων σεναρίων, μπορεί να οδηγήσει σε ένα τελευταίο σενάριο, στο οποίο ισχύουν συσσωρευτικά όλες οι μεμονωμένες επιλογές βελτιστοποίησης. Σύμφωνα με αυτό το βέλτιστο σενάριο, η συγκεκριμένη προσπάθεια προκύπτει τουλάχιστον σε θεωρητικό βαθμό επιτυχημένη. Όλοι οι οικονομικοί και περιβαλλοντικοί δείκτες αυξήθηκαν σε τιμές που εκδηλώνουν τον θετικό αντίκτυπο της μονάδας στην αγορά και στο περιβάλλον. Συγκεκριμένα, για τους δύο επιλεγμένους δείκτες η αύξηση τους σε σχέση με την αρχική λειτουργία ήταν +660% για το κέρδος εγχειρήματος και +504% για τη δέσμευση CO<sub>2</sub>. Θα πρέπει να σημειωθεί πως οι σημαντικά μεγάλες ποσοστιαίες αυξήσεις στους δείκτες οφείλονται στη μικρή δυναμικότητα της μονάδας και, κατά αναλογία, στη μεγάλη επίδραση που έχει οποιαδήποτε έστω και μικρή μεταβολή των λειτουργικών παραμέτρων.

Συμπερασματικά, μπορεί να ειπωθεί πως το βιοδιυλιστήριο 3<sup>ης</sup> γενιάς που σχεδιάστηκε και αναλύθηκε στην παρούσα εργασία μπορεί να ανταπεξέλθει ικανοποιητικά στις σημερινές απαιτήσεις των προϊόντων μικροφυκών και να αποφέρει κέρδη σε ετήσια βάση. Παράλληλα, ικανοποιεί και τις απαιτήσεις της «πράσινης» ανάπτυξης. Συνεπώς, το εγχείρημα κατασκευής μίας ολοκληρωμένης μονάδας καλλιέργειας μικροφυκών και παραγωγής πολλαπλών βιοχημικών προϊόντων είναι ιδιαίτερα ελπιδοφόρο, υπό αυστηρές όμως προδιαγραφές.

Οι εκτιμήσεις των οικονομικών κυρίως δεικτών απεικονίζουν τις μεγάλες βελτιώσεις που πρέπει να λάβουν χώρα για την επίτευξη ενός οικονομικά βιώσιμου βιοδιυλιστηρίου μεγάλης κλίμακας. Ένα σημαντικό ποσοστό των εσόδων της μονάδας θα πρέπει να προέρχεται από ειδικά προϊόντα με μικρότερο όγκο αγοράς, αλλά μεγαλύτερη οικονομική αξία (π.χ., χρωστικές ουσίες). Είναι παράλληλα σημαντικό να μειωθεί το κόστος παραγωγής των βιοπροϊόντων, υπό το φάσμα του αισθητού ανταγωνισμού από άλλες ανανεώσιμες πρώτες ύλες. Ενδεικτικά αναφέρεται η πολύ μεγάλη ποικιλία συστατικών που μπορούν να ανακτηθούν από τη λιγνοκυτταρινική βιομάζα. Ανάλογες τεχνικό-οικονομικές αναλύσεις έχουν αναδείξει τη σημαντικότητα επανεξέτασης των διεργασιών που εφαρμόζονται για την παραγωγή βιομάζας, την αφυδάτωση της και την ανάκτηση των προϊόντων. Σε κάθε περίπτωση, ενδείκνυται η απλοποίηση και τεχνολογική ενίσχυση τους.

Χωρίς αμφιβολία, ένα βιοδιυλιστήριο μικροφυκών κοστίζει σημαντικά, αλλά το κόστος αυτό μπορεί να αντισταθμιστεί. Προκειμένου να αναπτυχθεί μία κερδοφόρα αλυσίδα αξίας παραγωγής πολλαπλών προϊόντων από βιομάζα μικροφυκών απαιτείται συνδυασμός συγκεκριμένων συνισταμένων: (1) τεχνολογικές καινοτομίες για τη μείωση του παγίου και λειτουργικού κόστους, ειδικά στο στάδιο παραγωγής της βιομάζας μικροφυκών, (2) ανάπτυξη καθολικών πρακτικών που στοχεύουν στην αξιοποίηση ολόκληρης της βιομάζας, μέσω της κατανομής της σε επιμέρους οδούς εκμετάλλευσης, και (3) παραγωγή σειράς νέων ειδικών προϊόντων, τα οποία μπορούν να βρουν εφαρμογές ως ειδικά τρόφιμα, καλλυντικά σκευάσματα και φαρμακευτικά είδη.

Μόνο όταν πληρούνται οι ανωτέρω προϋποθέσεις μπορεί προκύψει μία νέα τεχνολογία βιοδιυλιστηρίου υπό οικονομικά και περιβαλλοντικά αειφόρο λειτουργία. Οποιαδήποτε σημαντική επένδυση πραγματοποιηθεί τα επόμενα χρόνια στον τομέα των μικροφυκών, θα πρέπει να ακολουθήσει τη συγκεκριμένη λογική.

## Βιβλιογραφία

- Almazan J.E., Romero-Dondiz E.M., Rajal V.B., Castro-Vidaurre E. *Nanofiltration of glucose: analysis of parameters and membrane characterization*. Chemical Engineering Research and Design 94 (2014) 485.
- *Ammonium Chloride Market Price & Analysis (2021)*. Διαθέσιμο στο: <https://www.echemi.com/productsInformation/pd20160226180734047-ammonium-chloride.html>
- Baller J., Thomassey M., Ziehmer M., Sanctuary R. *Thermal and chemical glass transition of thermosets in the presence of two types of inorganic nanoparticles*. Luxembourg. Nova Science Publishers, Inc. 2011.
- Banu J.R., Preethi, Kavitha S., Gunasekaran M., Kumar G. *Microalgae based biorefinery promoting circular bioeconomy-technoeconomic and life-cycle analysis*. Bioresource Technology 302 (2020) 122822.
- Basarnti L., Gualtieri P. *Is exploitation of microalgae economically and energetically sustainable?* Algal Research 31 (2018) 107.
- Benitez J. *Principles and modern applications of mass transfer operations*, 2<sup>nd</sup> ed., John Wiley & Sons, Inc. Publication, Mayagüez, 2009.
- Bhattacharya M., Goswami S. *Microalgae - A green multi-product biorefinery for future industrial prospects*. Biocatalysis and Agricultural Biotechnology 25 (2020) 101580.
- Brennan J.G., Butters J.R., Cowell N.D., Lilly A.E.V. *Food Engineering Operations*, 2<sup>nd</sup> ed., Applied Science Publishers Ltd., London, 1976.
- Cao T., Pázmándi M., Galambos I., Kovács Z. *Continuous production of galacto-oligosaccharides by an enzyme membrane reactor utilizing free enzymes*. Membranes 10 (2020) 203.
- Chaiklahan R., Chirasuwan N., Loha V., Tia S., Bunnag B. *Stepwise extraction of high-value chemicals from Arthrospira (Spirulina) and an economic feasibility study*. Biotechnology Reports 20 (2018) e00280.
- Cheah W.Y., Show P.L., Chang J.-S., Ling T.C., Juan J.C. *Biosequestration of atmospheric CO<sub>2</sub> and flue gas-containing CO<sub>2</sub> by microalgae*. Bioresource Technology 184 (2014) 190.
- Chemical Engineering. *Sources and Production Economics of Chemical Products*. McGraw-Hill, New York, 1973-1974, 121-180.
- Chew K.W., Yap J.Y., Pau L.S., Suan N.H., Juan J.C., Ling T.C., Lee D.-J., Chang J.-S.. *Microalgae biorefinery: High value products perspectives*. Bioresource Technology 229 (2017) 53.
- Currance P.L., Clements B., Bronstein A.C. *Emergency care for hazardous materials exposure*. 3<sup>rd</sup> revised edition, Elsevier Mosby, St. Louis, 2007.
- Dairy Processing Handbook. *The technology behind disruption of fat globules*, 2021. Διαθέσιμο στο: <https://dairyprocessinghandbook.tetrapak.com/chapter/homogenizers>
- Darvehei P., Bahri P.A., Moheimani N.R. *Model development for the growth of microalgae: A review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 97 (2018) 233.
- Davis R., Kinchin C., Markham J., Tan E., Laurens L., Sexton D., Knorr D., Schoen P., Lukas J. *Process design and economics for the conversion of algal biomass to biofuels: algal biomass fractionation to lipid and carbohydrate-derived fuel products*. National Renewable Energy Laboratory, U.S.A., 2014.
- Doran P.M. *Bioprocess engineering principles*, Waltham, Elsevier, 45 (2013) 445.
- Du X., Zhang J., Wang Y., Qu Y. *Conversion of carbohydrates into platform chemicals catalyzed by alkaline ionic liquids*, Beijing University of Chemical Technology, China, 2017.

- Elliott D., Sealock Jr., Butner R., Baker E., Neuenschwander G. *Low-temperature conversion of high-moisture biomass: Continuous reactor system results*. United States, U.S. Department of Energy, Pacific Northwest laboratory, Richland, Washington, 1989.
- *Employment cost index: wages and salaries: private industry workers*, U.S. Bureau of Labor Statistics 2021. Διαθέσιμο στο: <https://fred.stlouisfed.org/series/ECIWAG>
- Enamala M.K., Enamala S., Chavali M., Donepudi J., Yadavalli R., Kolapalli B., Aradhyula T.V., Velpuri J., Kuppam C. *Production of biofuels from microalgae - A review on cultivation, harvesting, lipid extraction, and numerous applications of microalgae*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 94 (2018) 49.
- Engler C.R., Ellen R., Marshall J., McFarland R., Lacewell D. *Economics and environmental impact of niogas production as a manure management strategy*. Texas. College station, 2003.
- *Equipment Cost Estimate*. Διαθέσιμο στο: <https://link.springer.com/content/pdf/bbm%3A978-94-011-6544-0%2F1.pdf>
- European Commission Cordis. *Biotechnological recycle of olive mills washing water by microalgae*, 2013. Διαθέσιμο στο: <https://cordis.europa.eu/project/id/232331/reporting>
- Farooq W., Suh W.I., Park M.S., Yang J.W. *Water use and its recycling in microalgae cultivation for biofuel application*. *Bioresource Technology* 184 (2014) 73.
- Fasaei F., Bitter J.H., Slegers P.M., van Boxtel A.J.B. *Techno-economic evaluation of microalgae harvesting and dewatering systems*. *Algal Research* 31 (2018) 347.
- Fasahati P., Liu J., Ohlrogge J.B., Saffron C.M. *Process design and economics for production of advanced biofuels from genetically modified lipid-producing sorghum*. *Applied Energy* 239 (2019) 1459.
- Ferreira C.C., Costa E.C., de Castro D.A.R., Pereira M.S., Mâncio A.A., Santos M.C., Lhamas D.E.L., da Mota S.A.P., Araújo M.E., Borges L.E.P., Machado N.T. *Fractional distillation of organic liquid compounds produced by catalytic cracking of fats, oils, and grease*. In book: *Distillation - Innovative Applications and Modeling*, 2017.
- Fernández F.G, Fernández Sevilla J.M., Grima E.M. *Costs analysis of microalgae production, Chapter 21*. Department of Chemical Engineering, University of Almería, Almería, Spain, 2019.
- Fu J., Huang Y., Liao Q., Xia A., Fu Q., Zhu X. *Photo-bioreactor design for microalgae: A review from the aspect of CO<sub>2</sub> transfer and conversion*. *Bioresource Technology* 292 (2019) 121947.
- García E.M.V., Fernández J.B., Olán-Acosta M., Petriz-Prieto M.A., Guzmán-López A., Bravo-Sánchez M.G. *Techno-Economic study of CO<sub>2</sub> capture of a thermoelectric plant using microalgae (*Chlorella vulgaris*) for production of feedstock for bioenergy*. *Energies* 13 (2020) 413.
- Geankoplis C.J. *Transport Processes and Unit Operations*. 3<sup>rd</sup> Ed., Prentice Hall, 1993.
- Gong J., You F. *Value-Added chemicals from microalgae: Greener, more economical, or both?* *ACS Sustainable Chemical Engineering* 3 (2014) 82.
- Guthrie, Kenneth M. *Process plant estimating, evaluation and control*. Craftsman Book Co., Solano Beach, CA. *Hydrocarbon Process.* 46 (1967) 135.
- Gutiérrez R., Ferrer I., Uggetti E., Arnabat C., Salvadó H., García J. *Settling velocity distribution of microalgal biomass from urban wastewater treatment high rate algal ponds*. *Algal Research* 16 (2016) 409.
- Hadiyanto S., Sutanto H., Suzery M. *Phycocyanin extraction from microalgae *Spirulina platensis* assisted by ultrasound irradiation: effect of time and temperature*. *Songklanakarin Journal of Science and Technology*, 2016.
- Hall C., Lambert G., Balogn S. *EROI of different fuels and the implications for society*. *Energy Policy* 64 (2014) 141.

- Hayes M., Bastiaens L., Luisa G. Gkelis S., Skomedal H., Skjanes K., Murray P., Vaquero M.G., Hosoglu M.I., Dodd J., Konstantinou D., Safarol I., Zittelli G.C., Laake M. Silva J.G.L., Pereira H., Abelho J. *Microalgal bioactive compounds including protein, peptides, and pigments: Applications, opportunities, and challenges during biorefinery processes*. Novel Proteins for Food, Pharmaceuticals, and Agriculture: Sources, Applications, and Advances (2019).
- Hee P.V., Anton P.J., Middelberg, Rob G.J.M., van der Lans L., van der Wielen A.M. *Relation between cell disruption conditions, cell debris particle size, and inclusion body release*. Department of Biotechnology, Delft University of Technology, Division of Chemical Engineering, University of Queensland, 2004.
- Heldman D.R., Singh R.P. *Food process engineering*, 2<sup>nd</sup> ed., The AVI Publishing Co. Inc., Westport, Connecticut (1981) 332.
- Hidalgo P., Ciudad G., Navia R. *Evaluation of different solvent mixtures in esterifiable lipids extraction from microalgae Botryococcus braunii for biodiesel production* *Bioresource Technology*. 201 (2015) 201.
- Höök M., Fantazzini D., Angelantoni A., Snowden S. *Hydrocarbon liquefaction: Viability as a peak oil mitigation strategy*. *Philosophical transactions of the royal society a mathematical physical and engineering sciences* 372 (2006) 20120319.
- Huang Q., Jiang F., Lianzhou W., Chao Y. *Design of Photobioreactors for Mass Cultivation of Photosynthetic Organisms*. Green Chemical Engineering 2017.
- Islam M.A., Brown R.J., O'Hara I., Kent M., Heimann K. *Effect of temperature and moisture on high pressure lipid/oil extraction from microalgae*. *Energy conversion and management* 88 (2014) 307.
- Jenckes L.C. *How to estimate operating costs and depreciation*. Chemical Engineering, 1970.
- Kaliyan N., Morey R.V., White M.D., Douhla T. *A Tub-Grinding/Roll-Press Compaction System to Increase Biomass Bulk Density: Preliminary Study*. University of Minnesota. ASABE Annual International Meeting, 2009.
- Karamerou E., Parsons S., McManus M., Chuck C. *Using techno-economic modelling to determine the minimum cost possible for a microbial palm oil substitute*. *Biotechnology for Biofuels*, Article number 57 (2021).
- Katopodis T., Markantonis I., Politi N., Vlachogiannis D., Sfetsos A. *High-Resolution solar climate Atlas for Greece under climate change using the weather research and forecasting (WRF) model*. Environmental Research Laboratory, 2020, NCSR "Demokritos".
- Kean C.W., Sahu J.N., Daud W.M.A.W. *Hydrothermal gasification of palm shell biomass for synthesis of hydrogen fuel*. *Bioresources* 8(2) (2013) 1831.
- Khan M., Shin J., Kim J. *The promising future of microalgae: current status, challenges, and optimization of a sustainable and renewable industry for biofuels, feed, and other products*. *Microbial Cell Factories* 17 (2018) 36.
- Khanra S., Mondal M., Halder G., Tiwari O.N., Gayen K., Bhowmick T.K. *Downstream processing of microalgae for pigments, protein and carbohydrate in industrial application: A review*, *Food and Bioproducts Processing* (2018).
- Kharbanda O.P. *Process plant and equipment cost estimation*. Craftsman Book Co., Solano Beach, CA, 1979.
- King C.J. *Separation Processes*. McGraw-Hill, Inc., 1971.
- Klinthong W., Yang Y., Huang C., Tan C. *A Review: Microalgae and their applications in CO<sub>2</sub> capture and renewable energy*. Department of Chemical Engineering, National Tsing Hua University, Taiwan, 2015.
- Kothandaraman A., Lars O., Bolland O., McRae G.J., McRae H.J. *Comparison of solvents for post-combustion capture of CO<sub>2</sub> by chemical absorption*. *Energy Procedia* 1(1):1373-138, 009

- Kris J., Ghawi A. *Study the effect of temperature on sedimentation tanks performance*. Slovak University of Technology, Faculty of Civil Engineering, Department of Sanitary and Environmental Engineering, 2008.
- Kuritza J.C., Camponogara G., Marques M., Sanagiotto D., Battiston C. *Dimensionless curves of centrifugal pumps for water supply systems: Development and case study*. Brazilian Journal of Water Resources, 2017.
- Lam G.P., Vermue M.H., Eppink M.H.M., Wijffels R.H., van den Berg C. *Multi-Product microalgae biorefineries: From concept towards reality*. Trends in Biotechnology, 36 (2018) 2.
- Lev A. *The analysis and calculation of the efficiency of a homogenizing valve*. Journal of Food Engineering 23(4) (1994) 429.
- Liu Z., Wang K., Chen Y., Tan T., Nielsen. J. *Third-generation biorefineries as the means to produce fuels and chemicals from CO<sub>2</sub>*. Nature Catalysis, 2020.
- Lopes E.J., Maroneze M.M., Depira M.C., Sartori R.B., Dias R., Zepka L. *Bioactive food compounds from microalgae: an innovative framework on industrial biorefineries*. Department of Food Science and Technology, Federal University of Santa Maria (UFSM), Brazil, 2019. Διαθέσιμο στο: <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2018.12.003>
- Masojidek J., Torzillo G. *Mass cultivation of freshwater microalgae*. Encyclopedia of Ecology 2008, 2226-2235.
- McCabe W.L., Smith J.C., Harriott P. *Βασικές διεργασίες χημικής μηχανικής*, (Πολυματίδου Σ., Εκδ. Τζιόλα, Θεσσαλονίκη), 2001, 849-885,.
- *Membrane filtration*, National Drinking Water Clearing House, 1999.
- Morais W.G., Gorgich M., Correa P.S., Martins A.A., Mata T.M., Caetano N.S. *Microalgae for biotechnological applications: Cultivation, harvesting and biomass processing*. Aquaculture 528 (2020) 735562.
- Muneer F., Hovmalm H., Svensson S., Newson W., Johansson E., Prade T. *Economic viability of protein concentrate production from green biomass of intermediate crops: A pre-feasibility study*. Journal of Cleaner Production Volume 294 (2021) 126304.
- Nitsos C., Filali R., Taidi B., Lemaire J. *Current and novel approaches to downstream processing of microalgae: A review*. Biotechnology Advances (2020).
- Nurarifudin M., Hashim H., Shiuna L., Siong H. *Economic assessment of microalgae-based CO<sub>2</sub> utilization in power plant sector in Malaysia*. A publication of the Italian association of chemical engineering, 2017. Διαθέσιμο στο: [www.aidic.it/cet](http://www.aidic.it/cet)
- Ohsol, E. O. *Estimating marketing costs*. Chemical Engineering (1971).
- Penloglou G., Kiparissides C. *Techno-Economic Analysis of Multiple Scenarios for the Production of Microalgal Chemicals and Polymers*, 2019.
- Peters M.S., Timmerhause K.D., West R.E. *Σχεδιασμός και οικονομική μελέτη εγκαταστάσεων για μηχανικούς*. Εκδόσεις Τζιόλα, Ελλάδα, 2020.
- Pierobon S.C., Cheng X., Graham P.J., Nguyen B., Karakolis E.G., Sinton D. *Emerging microalgae technology: a review*. Sustainable energy & fuels, (2017) 13.
- *Producer price index by industry: chemical manufacturing*, 2021, U.S. Bureau of Labor Statistic. Διαθέσιμο στο: <https://fred.stlouisfed.org/series/PCU325325>
- Pruvost J., Borgne F., Artu A., Cornet J.-F., Legrand J. *Industrial photobioreactors and scale-up concepts*. Elsevier. Advances chemical engineering 48 (2016) 257.
- Pruvost J. *Photobioreactor engineering for solar microalgae cultivation: methodology and applications*. Santa Fe Convention Center, Santa Fe, New Mexico, USA, 2014.
- Ramli R., Bolong N. *Effects of pressure and temperature on ultrafiltration hollow fiber membrane in mobile water treatment system*. Journal of Engineering Science and Technology 11(7) (2016) 1031.

- Richardson J.W, Johnson M.D., Zhang X., Zemke P., Chen W., Hu Q. *A financial assessment of two alternative cultivation systems and their contributions to algae biofuel economic viability*. Algal Research, 2014.
- Rodriguez-Donis I., Gerbaud V., Arias-Barreto A., Joulia X. *Heterogeneous batch distillation processes for waste solvent recovery in pharmaceutical industry*, 2009. Διαθέσιμο στο: <https://core.ac.uk/download/pdf/12041197.pdf>
- Rousseau R.W. (ed.), *Handbook of separation process technology*. John Wiley & Sons Inc., 1987.
- Razzak S.A., Ali. S.A.M., Hossain M.M., DeLasa H. *Biological CO<sub>2</sub> fixation with production of microalgae in wastewater – A review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 76 (2017) 379.
- Rezvani S., Moheimani N.R., Bahri P.A. *Technoeconomic assessment of CO<sub>2</sub> bio-fixation using microalgae in connection with three different state-of-the-art power plants*, Computers and Chemical Engineering , 84, (2016) 290.
- Rizwan M., Mujtaba G., Memon S.A., Lee K., Rashid N. *Exploring the potential of microalgae for new biotechnology applications and beyond: A review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 92 (2018) 394.
- Salih F.M. *Microalgae tolerance to high concentrations of carbon dioxide: a review*. Journal of environmental protection 2 (2011) 648.
- Sathasivam R., Radhakrishnan R., Hashem A., Fathi Abd\_Allah E., *Microalgae metabolites: A rich source for food and medicine*. Saudi journal of biological sciences 26(4) (2019) 709.
- Schweitzer P.A. *Handbook of separation techniques for chemical engineers*. New York, McGraw-Hill, Inc., 1979.
- Seo Y.C., Choi W.S., Park J.H., Park J.O., Jung K.-H., Lee H.Y. *Stable isolation of phycocyanin from spirulina platensis associated with high-pressure extraction process*. International Journal of Molecular Science 14(1) (2013) 1778.
- Siatou A. Manali A., Gikas P. *Energy consumption and internal distribution in activated sludge wastewater treatment plants of Greece*. Design of environmental processes laboratory, School of environmental engineering, Technical University of Crete, Chania, Greece, 2020.
- Singh G., Patidar S.K. *Microalgae harvesting techniques: A review*. Journal of Environmental Management 217 (2018) 499.
- Solimeno A., Samsó R., Uggetti E., Sialve B., Steyer J.-P., Gabarro A., Garcia J. *New mechanistic model to simulate microalgae growth*. Algal Research 12 (2015) 350.
- Stunda-Zujeva A. *Review of Spirulina/Arthrospira growth medium modifications*. Key engineering materials 850 (2020) 153.
- Sukatta U., Rugthaworn P., Punjee P., Chidchenchey S., Keeratinijakal V. *Chemical composition and physical properties of oil from Plai (Zingiber cassumunar Roxb.) obtained by hydro distillation and Hexane Extraction*. Natural Sciences 43 (2009) 212.
- Suparmaniam U., Lam M.K., Uemura Y., Lun J.W., Lee K.T., Shuit S.H. *Insights into the microalgae cultivation technology and harvesting process for biofuel production: A review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 115 (2019) 109361.
- Tang D.Y.Y., Khoo K.S., Chew K.W., Tao Y., Ho S.-H., Show P.L.. *Potential utilization of bioproducts from microalgae for the quality enhancement of natural products*. Bioresource Technology 304 (2020) 122997.
- Toth A.J., Szilagyí B., Haaz E., Solti S., Nagy T., Tarjani A.J., Valentinyi N., Mizsey P. *Separation of mixture containing maximum boiling azeotrope with extractive heterogeneous-azeotropic distillation*. Chemical engineering transactions 69 (2018) 571.
- Towler G., Sinnott R. *Chemical engineering design*. United States, 2012, 319.
- Tzia C., Liadakis G. *Extraction optimization in food engineering*, Marcel Dekker Inc., New York, 2003.

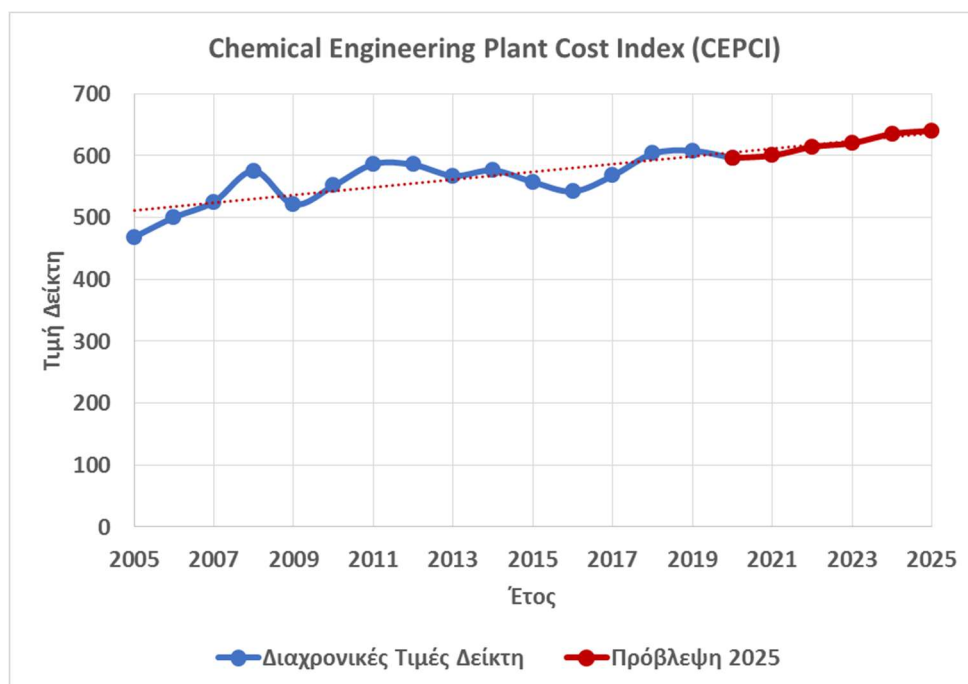
- Vema R., Srivastava A. *Carbon dioxide sequestration and its enhanced utilization by photoautotroph microalgae*. Environmental Development 27 (2018) 95.
- Vuppaladadiyam A.K., Prinsen P., Raheem A., Luque R., Zhao M. *Microalgae cultivation and metabolites production: a comprehensive review*. Biofuels, Bioproducts and Biorefinery 12(2) (2018) 304.
- Wankat P.C. *Equilibrium staged separations*. Prentice Hall PTR, 1988.
- Wankat P.C. *Separation process engineering*, 3<sup>rd</sup> ed., Pearson Education, Inc., Prentice Hall, 2012.
- Woods D. *Rules of thumb in engineering practice*. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2007.
- Yang F., Xiang W., Sun X., Wu H., Li T., Long L. *A novel lipid extraction method from wet microalgae Picochlorum sp. at room temperature*. Marine Drugs. 12(3) (2014).
- Zhang X. *Microalgae removal of CO<sub>2</sub> from flue gas*. London. IEA Clean Coal Centre, 2015
- Zheng Q., Xu X., Martin G.J.O., Kentish S.E. *Critical review of strategies for CO<sub>2</sub> delivery to large-scale microalgae cultures*. Chinese Journal of Chemical Engineering 26 (2018) 2219.
- Zhu Y., Jones S., Anderson B., Daniel B. *Algae farm cost model: Considerations for photobioreactors*. United States, 2018.
- Βλυσίδης Α., Γρηγοροπούλου Ε., Λυμπεράτος Γ. *Περιβαλλοντική μηχανική*. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2019. Διαθέσιμο στο: <https://docplayer.gr/36309663-Perivallontiki-mihaniki.html>
- Δ.Ε.Η., Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού, Διεύθυνση Περιβάλλοντος. Διαθέσιμα δεδομένα μετά από προσωπική επικοινωνία στα πλαίσια του ερευνητικού Έργου CO<sub>2</sub>-BioProducts, 2021.
- Κόλλιας, Λ. *Παραγωγή βιοντίζελ από μικροφύκη*. Διπλωματική εργασία. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2013. Διαθέσιμο στο: [https://dspace.lib.ntua.gr/xmlui/bitstream/handle/123456789/8472/kollias\\_biodiesel.pdf?sequence=1](https://dspace.lib.ntua.gr/xmlui/bitstream/handle/123456789/8472/kollias_biodiesel.pdf?sequence=1)
- Κούκος Ι. *Εισαγωγή στον σχεδιασμό χημικών εργοστασίων*. Εκδόσεις Τζιόλα, 2019.
- Κροκίδα Μ., Μαρίνος-Κουρής Δ., Μαρούλης Ζ.Β., *Σχεδιασμός θερμικών διεργασιών*. Πανεπιστημιακές Εκδόσεις ΕΜΠ, 2003.
- Μαγγιλιώτου Α., Ασσαέλ Μ.Ι. *Φυσικές διεργασίες. Εισαγωγή στον υπολογισμό τους*. Εκδόσεις Τζιόλα, 1998.
- Νταράκας Ε. *Τεχνική Περιβάλλοντος*. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη, 2014. Διαθέσιμο στο : <https://opencourses.auth.gr/courses/OCRS460/>
- Παύλου Α., Πενλόγλου Γ., Κυπαρισσίδης Κ. *Βιοκαύσιμα και βιοπροϊόντα από μικροφύκη: το παρόν και το μέλλον*. Θεσσαλονίκη, 2019.
- Σαραβάκος Γ.Δ., *Τεχνική φυσικών διαχωρισμών*. ΕΜΠ, 1985.
- Χώτος, Γ. *Βιολογία των φυκών*, 2018. Διαθέσιμο στο: <http://www.tay.teiwest.gr/photos/wp-content/uploads/sites/11/2018/10/ALGAE-BASICS-1-HOTOS-read-only-2.pdf>
- Ψαχουλιά Π.. *Μελέτη φάσματος φωτός για τη φωτοσυνθετική καλλιέργεια μικροφυκών σε βιοαντιδραστήρα κλίμακας εργαστηρίου*. Διπλωματική εργασία. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη, 2018. Διαθέσιμο στο: [https://ikee.lib.auth.gr/record/297781/files/Diploma%20Thesis\\_Psachoulia%20Paraskevi.pdf](https://ikee.lib.auth.gr/record/297781/files/Diploma%20Thesis_Psachoulia%20Paraskevi.pdf)



## Παράρτημα

### Δείκτης Κόστους Εγκαταστάσεων Χημικής Μηχανικής (CEPCI)

Ο Δείκτης Κόστους Εγκαταστάσεων Χημικής Μηχανικής (Chemical Engineering Plant Cost Index, CEPCI) είναι ένας αδιάστατος αριθμός που χρησιμοποιείται για τη μετατροπή του κεφαλαιουχικού κόστους που απαιτείται για την κατασκευή ενός χημικού εργοστασίου από παλαιότερη ημερομηνία σε μεταγενέστερο χρόνο. Αυτός ο δείκτης είναι ευρέως αποδεκτός και αποτελείται από υπό-δείκτες που αφορούν τον εξοπλισμό, το κόστος εργασίας, τα κτίρια, τη μελέτη, την εποπτεία και άλλες παραμέτρους που επηρεάζουν το κόστος. Στο Σχήμα Π.1 αναλύεται η μεταβολή του δείκτη από το 2005 έως το 2025. Προκύπτει πως κατά κανόνα η ετήσια τιμή του δείκτη αυξάνει σταδιακά. Με βάση την πορεία ανόδου από το 2005 μέχρι σήμερα, επιχειρείται πρόβλεψη της τιμής του δείκτη για το 2025, έτος που ορίζεται ως η χρονική στιγμή έναρξης κατασκευής της μονάδας.

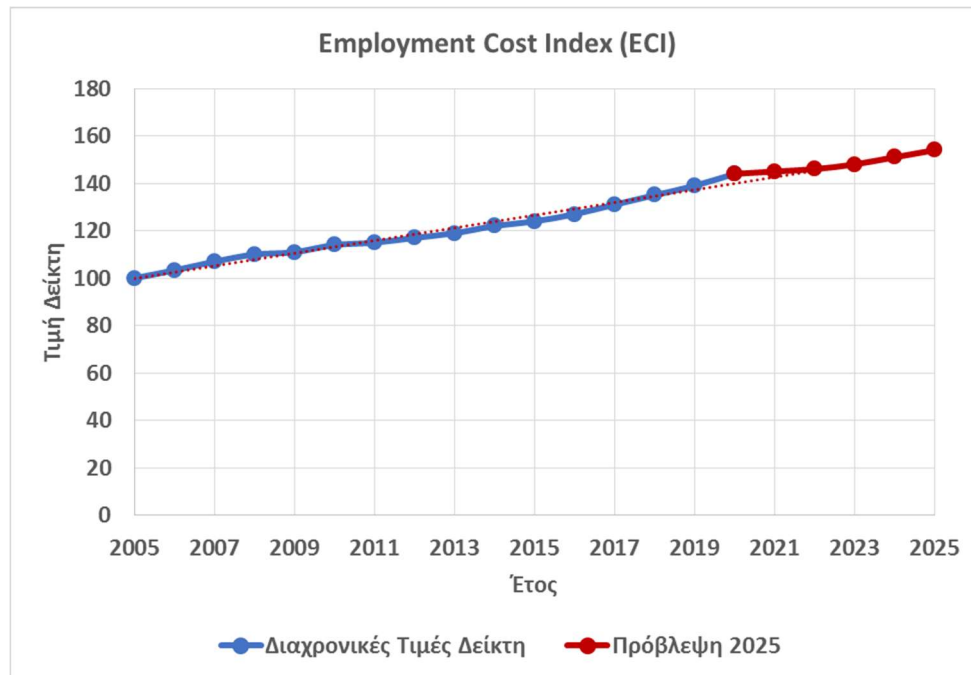


Σχήμα Π.1. Δείκτης κόστους εγκαταστάσεων χημικής μηχανικής (Hook et al., 2014).

### Δείκτης Κόστους Απασχόλησης (ECI)

Ο Δείκτης Κόστους Απασχόλησης (Employment Cost Index, ECI) αποτελεί ένα τριμηνιαίο μέτρο που αντιπροσωπεύει την αλλαγή στο κόστος εργασίας και περιλαμβάνει τις αλλαγές στους μισθούς και στις εργοδοτικές δαπάνες για τις παροχές των εργαζομένων, αλλά είναι απαλλαγμένος από την επίδραση των μετακινήσεων στην απασχόληση μεταξύ των

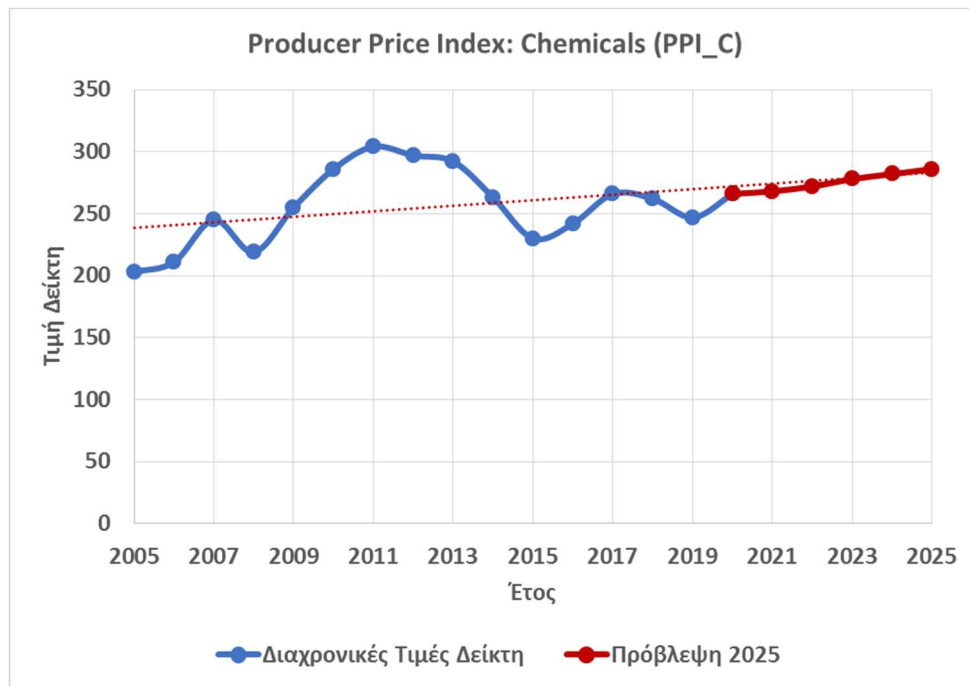
επαγγελματιών και των βιομηχανιών. Ο ECI είναι ένα κύριος οικονομικός δείκτης για το μέτρο του κόστους εργασίας και αντιμετωπίζει τους μισθούς και τη συνολική αποζημίωση του ανθρώπινου δυναμικού με συνέπεια. Η χρονική μεταβολή από το 2005 έως σήμερα και η αντίστοιχη πρόβλεψη του δείκτη για το 2025 παρουσιάζονται στο Σχήμα Π.2. Όπως είναι αναμενόμενο, η τιμή του δείκτη ακολουθεί ανοδική πορεία κατά την πορεία του χρόνου, καθώς όσο αυξάνονται οι απαιτήσεις για την κατασκευή ενός εργοστασίου, τόσο αυξάνονται και οι απαιτήσεις στο επίπεδο εργασίας-απασχόλησης των εργαζομένων.



**Σχήμα Π.2.** Δείκτης κόστους απασχόλησης (U.S. Bureau of Labor Statistics, 2021).

### **Δείκτης Τιμών Παραγωγού (PPI)**

Ο Δείκτης Τιμών Παραγωγού (Producer Price Index, PPI) προσδιορίζει τη μέση μεταβολή των τιμών πώλησης που ορίζουν οι βιομηχανίες για τα προϊόντα τους. Είναι ένα σύνολο δεικτών, από το οποίο ο δείκτης που χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία αντιστοιχεί στα χημικά προϊόντα (Chemicals, PPI\_C). Ο δείκτης αυτός παρακολουθεί τις αλλαγές στο κόστος παραγωγής των συγκεκριμένων προϊόντων και αντιστοιχεί στην εμπορική τους αξία. Συνεπώς, θεωρείται το πιο χρήσιμο εργαλείο για την προσαρμογή των τιμών στις μακροπρόθεσμες συμφωνίες αγοράς και πώλησης. Θα πρέπει να σημειωθεί πως ο PPI διαφέρει από τον CECI καθώς ο πρώτος αντιστοιχεί στο κόστος από την πλευρά των βιομηχανιών που παράγουν τα προϊόντα, ενώ ο δεύτερος απεικονίζει τις τιμές από την πλευρά των καταναλωτών. Η μεταβολή στην τιμή του δείκτη (με εμφανή τη συνεχή μέση αυξητική του τάση) από το 2005 έως το 2025, συμπεριλαμβάνοντας την κατάλληλη πρόβλεψη, παρουσιάζεται στο Σχήμα Π.3.



**Σχήμα Π.3.** Δείκτης τιμών παραγωγής (U.S. Bureau of Labor Statistics, 2021).

### Χρήση των Δεικτών

Όπως αναφέρεται και στη μεθοδολογία της παρούσας εργασίας, οι τρεις παραπάνω δείκτες χρησιμοποιούνται για την πρόβλεψη συγκεκριμένων οικονομικών τιμών στο έτος αναφοράς κατασκευής της μονάδας, το 2025. Πιο αναλυτικά, τα κόστη και οι αξίες που αφορούν τον πάγιο εξοπλισμό, τις πρώτες ύλες, τις βοηθητικές παροχές, τα εργατικά και τα τελικά προϊόντα εντοπίζονται βιβλιογραφικά και μέσω ανάλυσης της αγοράς για διάφορα έτη. Για την ορθότερη οικονομική ανάλυση, οι τιμές αυτές προβλέπονται για το 2025 ως εξής:

$$C_{2025} = C_X \cdot \frac{I_{2025}}{I_X} \quad [\text{Π.1}]$$

Όπου:

- C: η τιμή του οικονομικού μεγέθους ενδιαφέροντος (πάγιο κόστος προμήθειας, κόστος πρώτης ύλης, βοηθητικής παροχής και εργατικών, αξία προϊόντων).
- X: έτος αναφοράς της τιμής του κάθε δείκτη (πραγματική τιμή που εντοπίστηκε πριν το 2021).
- I: η ιστορική τιμή του δείκτη πριν το 2021 (CEPCI, ECI και PPI\_C).