

ΒΙΟΜΕΤΑΤΡΟΠΗ ΤΟΥ CO₂ ΑΠΟ ΑΕΡΙΟΥΣ ΡΥΠΟΥΣ ΜΟΝΑΔΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΕ ΠΡΟΪΟΝΤΑ ΥΨΗΛΗΣ ΑΞΙΑΣ ΜΕΣΩ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΩΝ ΜΙΚΡΟΦΥΚΩΝ**Γ. Πενλόγλου¹, Α. Παύλου¹, Κ. Κυπαρισσίδης^{1,2,*}**¹Ινστιτούτο Χημικών Διεργασιών και Ενεργειακών Πόρων (ΙΔΕΠ), Εθνικό Κέντρο Έρευνας και Τεχνολογικής Ανάπτυξης (ΕΚΕΤΑ), Θεσσαλονίκη, Ελλάδα²Τμήμα Χημικών Μηχανικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης (ΑΠΘ), Θεσσαλονίκη, Ελλάδα(* costas.kiparissides@cperi.certh.gr)**ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Μεταξύ των διαφορετικών τύπων βιομάζας, η βιομάζα μικροφυκών αποτελεί σήμερα βασική ανανεώσιμη πρώτη ύλη για την παραγωγή πολλαπλών βιοπροϊόντων στα πλαίσια των βιοδιυλιστηρίων 3^{ης} γενιάς. Η πρακτική αυτή αναμένεται να έχει μεγάλο θετικό περιβαλλοντικό αντίκτυπο στο μέλλον, εάν πραγματοποιηθεί με παράλληλη δέσμευση και μετατροπή σημαντικών ποσοτήτων CO₂ από αέρια απόβλητα. Ωστόσο, προς το παρόν σημαντικά τεχνολογικά και οικονομικά εμπόδια, καθώς και η έλλειψη συστηματικής γνώσης για τα επιμέρους στάδια της παραγωγής, αποτρέπουν την αειφόρο λειτουργία των διεργασιών αυτών σε οικονομικά βιώσιμη βιομηχανική κλίμακα. Σε αυτό το πλαίσιο, η παρούσα εργασία πραγματεύεται την παραγωγή βιοπροϊόντων υψηλής προστιθέμενης αξίας, μέσω της βιομετατροπής του διαθέσιμου CO₂ από μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, χρησιμοποιώντας μικροφύκη. Η προτεινόμενη τεχνολογία αναπτύσσεται με σκοπό την ανάκτηση από τη βιομάζα μικροφυκών πολύτιμων βιοχημικών ενώσεων (π.χ., πρωτεΐνες, υδατάνθρακες, λιπαρά οξέα, χρωστικές, βιταμίνες) με δυνητικές εφαρμογές σε καλλυντικά και διατροφικά προϊόντα.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα μικροφύκη αποτελούν μια εναλλακτική στις ορυκτές πηγές πρώτη ύλη, καθώς μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή πολλαπλών βιοπροϊόντων, όπως υδατανθράκων, πρωτεϊνών, λιπιδίων και χρωστικών ^[1]. Αυτό το γεγονός αποτελεί ένα ξεχωριστό πλεονέκτημα των μικροφυκών κατά την αξιοποίηση τους σε μια μονάδα βιοδιυλιστηρίου ^[2]. Παράλληλα, παρουσιάζει εξαιρετικό ενδιαφέρον η δυνατότητα των μικροφυκών να αναπτυχθούν χρησιμοποιώντας στη διαδικασία της φωτοσύνθεσης διοξείδιο του άνθρακα (CO₂) που προέρχεται από αέριους ρύπους μονάδων παραγωγής ενέργειας, παρέχοντας ένα επιπλέον περιβαλλοντικό κίνητρο για την αποτελεσματική εφαρμογή τους σε υψηλή κλίμακα παραγωγής ^[3]. Επιπλέον, υγρά και στερεά απόβλητα μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην ανάπτυξη των μικροφυκών ως φθηνές πηγές θρεπτικών συστατικών, κυρίως νιτρικών και φωσφορικών ^[4].

Τα βιοχημικά προϊόντα που παράγονται από μικροφύκη (υδατάνθρακες, πρωτεΐνες και λιπίδια) μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μια ποικιλία εφαρμογών ^[1]. Πιο συγκεκριμένα, υδατάνθρακες (π.χ., μονομερή σάκχαρα και ολιγοσακχαρίτες) μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως πρώτες ύλες στην παραγωγή μέσω ενζύμων ή βακτηρίων βιοχημικών, βιοπολυμερών και βιοκαυσίμων. Οι πρωτεΐνες που παράγονται από τα μικροφύκη είναι βιολογικά προϊόντα χαμηλού όγκου αλλά υψηλής προστιθέμενης αξίας και μπορούν να βρουν εφαρμογή σε βιομηχανίες τροφίμων, φαρμακευτικών και καλλυντικών ^[5]. Τέλος, τα λιπίδια εκτός από τη χρήση τους για την παραγωγή βιοντίζελ (μέσω μετεστεροποίησης ή καταλυτικής υδρογονοεπεξεργασίας) μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε βιομηχανίες καλλυντικών και τροφίμων (π.χ., τα ω-3 λιπαρά οξέα) ^[5].

Στις αυτότροφες διεργασίες ανάπτυξης μικροφυκών, οι ρυθμοί συσσώρευσης ενδοκυττάρων μεταβολιτών επηρεάζονται τόσο από τις συνθήκες καλλιέργειας όσο και από τις πολιτικές τροφοδοσίας θρεπτικών ουσιών. Οι πιο σημαντικές μεταξύ των παραμέτρων που επηρεάζουν την παραγωγή βιομάζας και τον ρυθμό παραγωγής βιοχημικών είναι ο κύκλος φωτός και η ένταση

αυτού, η θερμοκρασία, το pH, η αναλογία παροχής CO₂ προς αέρα, η αλατότητα και η περιεκτικότητα σε θρεπτικά συστατικά στο μέσο καλλιέργειας (ιδιαίτερα η συγκέντρωση πηγής αζώτου)^[6]. Για το λόγο αυτό, κατά την πειραματική διερεύνηση μιας διεργασίας μικροφυκών είναι απαραίτητο να αναλυθεί ένας αρκετά μεγάλος αριθμός παραμέτρων, γεγονός που οδηγεί σε ένα απαγορευτικά μεγάλο αριθμό πειραμάτων. Για να αντιμετωπιστεί το ζήτημα αυτό μπορεί να εφαρμοστεί στατιστικός σχεδιασμός πειραμάτων, με βάση μια στατιστική μέθοδο (Taguchi). Η μέθοδος Taguchi ελαχιστοποιεί τον αριθμό των απαιτούμενων πειραμάτων και εξασφαλίζει τη στατιστική σημαντικότητα των πειραματικών αποτελεσμάτων και συμπερασμάτων.

Στόχος της παρούσας εργασίας είναι η διερεύνηση της δυνατότητας ανάπτυξης ενός βιοδιυλιστηρίου εκμετάλλευσης βιομάζας προερχόμενης από στελέχη μικροφυκών, τα οποία δεσμεύουν CO₂ από αέριους ρύπους μονάδων παραγωγής ενέργειας και το μετατρέπουν σε προϊόντα υψηλής προστιθέμενης αξίας. Πιο συγκεκριμένα, μελετάται η επίδραση πέντε παραμέτρων καλλιέργειας του στελέχους *Stichococcus* sp., συγκεκριμένα η ένταση φωτός, ο ρυθμός αερισμού, ο ρυθμός παροχής CO₂, η συγκέντρωση πηγής αζώτου και η αλατότητα του μέσου καλλιέργειας, στον ρυθμό ανάπτυξης της βιομάζας και την ταυτόχρονη παραγωγή υδατανθράκων, πρωτεϊνών και λιπιδίων. Επίσης, πραγματοποιούνται προβλέψεις των βέλτιστων πολιτικών παραγωγής για τη μεγιστοποίηση της παραγωγής επιλεγμένων βιοπροϊόντων (βιομάζα μικροφυκών, υδατάνθρακες, πρωτεΐνες, λιπίδια ή ολικά βιοπροϊόντα) με βάση στατιστικά καθορισμένα μοντέλα παλινδρόμησης, οι οποίες στη συνέχεια επαληθεύονται πειραματικά.

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΒΙΟΔΙΥΛΙΣΤΗΡΙΟΥ

Η παρούσα μελέτη αποτελεί τμήμα μιας ευρύτερης προσπάθειας ανάπτυξης ενός ολοκληρωμένου βιοδιυλιστηρίου 3^{ης} γενιάς. Το επιλεγμένο στέλεχος *Stichococcus* sp. μελετάται (μαζί με άλλα στελέχη, π.χ., *Arthrospira* sp.) ως προς την ανοχή του σε αέρια μίγματα CO₂ (ανοχή σε NO_x, SO_x, σωματίδια, κλπ.), τα οποία προέρχονται από μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Η μελέτη πραγματοποιείται αρχικά σε μικρής κλίμακας καλλιέργειες, με παρακολούθηση των ρυθμών παραγωγής βιομάζας και βιοχημικών, ταυτόχρονα με την παρουσία βιοενεργών συστατικών και δευτερογενών μεταβολιτών^[7]. Στη συνέχεια, η βιομετατροπή του διαθέσιμου CO₂ σε πολύτιμα βιοπροϊόντα μεταφέρεται σε κλίμακα φωτό-βιοαντιδραστήρα (PBR), όπου πραγματοποιείται η καλλιέργεια του επιλεγμένου και βελτιστοποιημένου στελέχους, σε πλήρως ελεγχόμενες συνθήκες φωτισμού και παροχής θρεπτικών συστατικών^[7,8]. Η ανάκτηση της βιομάζας από την καλλιέργεια πραγματοποιείται μέσω συμβατικών μεθόδων (π.χ., φυγοκέντρωση, αφυδάτωση και ξήρανση), οι οποίες βελτιστοποιούνται πριν τον διαχωρισμό των βιοενεργών συστατικών μέσω πλήρους κλασμάτωσης της βιομάζας. Τα πρωτεύοντα (βιοενεργά συστατικά) και δευτερεύοντα (κλασματωμένη βιομάζα) βιοπροϊόντα χαρακτηρίζονται πλήρως, τόσο ποσοτικά, όσο και ποιοτικά, δίνοντας έμφαση στη χημική σύσταση κάθε κλάσματος, σε συνάρτηση με τα διαφορετικά μίγματα τροφοδοσίας CO₂. Η αξιολόγηση λαμβάνει χώρα σε πλήρη συσχέτιση με τις προδιαγραφές των στοχευμένων εφαρμογών σε καλλυντικά και διατροφικά προϊόντα (π.χ., αντιοξειδωτικές ιδιότητες). Το σύνολο των παραπάνω διεργασιών ολοκληρώνεται σε μια ενιαία αλυσίδα αξίας με σκοπό την αξιολόγηση της προτεινόμενης τεχνολογίας σε βιομηχανική κλίμακα. Συγκεκριμένα, διερευνάται το δυναμικό αξιοποίησης του CO₂ από τους σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, σύμφωνα με τα συγκεκριμένα δεδομένα της εγχώριας αγοράς, καθώς και σχετικούς περιορισμούς και απαιτήσεις^[8]. Τέλος, η πλήρης διεργασία προσομοιώνεται σε κατάλληλο λογισμικό για την τεχνική και οικονομική ανάλυση της, καθώς και την ανάλυση κύκλου ζωής.

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Το θαλάσσιο στέλεχος *Stichococcus* sp. απομονώθηκε από την παράκτια περιοχή της Κρήτης. Η φυσιολογία και τα χαρακτηριστικά της καλλιέργειας σε σχέση με την ανάπτυξη της βιομάζας και τη στοχευμένη παραγωγή βιοχημικών ενώσεων (υδατανθράκων, πρωτεϊνών και λιπιδίων)

μελετήθηκαν μέσω πειραμάτων ασυνεχούς λειτουργίας σε επίπεδο εργαστηριακής κλίμακας. Φιάλες Erlenmeyer χωρητικότητας 500 cm³ πληρώθηκαν αρχικά με 185 cm³ μέσου καλλιέργειας και εμβολιάστηκαν με 15 cm³ ώριμης προκαλλιέργειας. Ακολούθως, οι φιάλες επώαστηκαν για 15 ημέρες στους 25 °C, σε ανακινούμενο επωαστήρα (GFL 3031), με σταθερό ρυθμό ανακίνησης 1,33 Hz. Ως μέσο καλλιέργειας χρησιμοποιήθηκε το μέσο MBB (Modified Bold Basal), τροποποιημένο καταλλήλως για την αυτότροφη καλλιέργεια μικροφυκών και περιείχε (σε g·L⁻¹): NaNO₃ 0,25, KH₂PO₄ 0,175, K₂HPO₄ 0,075, MgSO₄·7H₂O 0,075, CaCl₂·2H₂O 0,025, NaCl 35. Το μέσο MBB ήταν επίσης εμπλουτισμένο με διάλυμα ιχνοστοιχείων (σε mg·L⁻¹): FeSO₄·7H₂O 0,60, EDTA 3,92, Na₂MoO₄·2H₂O 0,03, CoCl₂·6H₂O 0,02, MnCl₂·4H₂O 0,25, ZnCl₂ 0,03 και βιταμινών (σε mg·L⁻¹): B1 1,2, B12 0,01). Όλα τα θρεπτικά συστατικά υποβλήθηκαν σε αποστείρωση (στους 121 °C για 15 min) σε ξεχωριστά διαλύματα. Τα διαλύματα ιχνοστοιχείων και βιταμινών αποστειρώθηκαν με φίλτρα 0,20 μm (Whatman). Η αρχική τιμή pH του μέσου ήταν περίπου 6,5 και ρυθμίστηκε με φωσφορικό ρυθμιστικό διάλυμα που συμπεριελήφθη στο μέσο καλλιέργειας (KH₂PO₄/K₂HPO₄). Μίγμα CO₂-αέρα (κλάσμα όγκου 10% CO₂ και 18,8% O₂ σε N₂) διοχετεύθηκε στο υγρό μέσο καλλιέργειας ως μοναδική πηγή άνθρακα. Τέλος, το προφίλ φωτισμού ορίστηκε ως εξής: φωτισμός για 16 h ακολουθούμενος από σκοτάδι για 8 h. Για το φωτισμό χρησιμοποιήθηκαν λαμπτήρες LED ψυχρού φωτός ημέρας (Osram SubstiTube advanced, 10 W/6500 K, 1100 lm), τοποθετημένοι συμμετρικά στις πλευρές του επωαστήρα.

Η μέθοδος στατιστικού σχεδιασμού Taguchi χρησιμοποιήθηκε για να προσδιοριστούν οι πειραματικές συνθήκες όσον αφορά τις πέντε επιλεγμένες παραμέτρους της διεργασίας: (i) ένταση φωτός, (ii) ρυθμός αερισμού, (iii) ρυθμός παροχής CO₂, (iv) αρχική συγκέντρωση NaNO₃ στο μέσο καλλιέργειας και (v) αλατότητα του μέσου καλλιέργειας. Τα επιλεγμένα χαμηλά, μεσαία και υψηλά επίπεδα των παραμέτρων (μόνο χαμηλό και υψηλό επίπεδο για τον φωτισμό) ήταν ίσα με: (i) 4400-8800 lm, (ii) 0-100-200 cm³·min⁻¹, (iii) 0-25-50 cm³·min⁻¹, (iv) 140-250-750 mg·L⁻¹ και (v) 0,25-17,5-35 g·L⁻¹, αντίστοιχα. Η εφαρμογή του σχεδιασμού και η ανάλυση των αποτελεσμάτων πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια του στατιστικού λογισμικού Minitab 17. Έτσι, προσδιορίστηκαν οι πειραματικές συνθήκες 18 πειραμάτων ασυνεχούς λειτουργίας (από 162 πιθανά πειράματα). Όλα τα πειράματα εκτελέστηκαν εις διπλούν και καταγράφηκαν οι μέσες τιμές τους. Οι αναλυτικές μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν όπως περιγράφονται από τους Kararatsia et al. [7].

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Με βάση την ανάλυση μέσω της μεθόδου Taguchi προέκυψαν τα βέλτιστα επίπεδα των μεταβλητών εισόδου της διεργασίας που μεγιστοποιούν την παραγωγή των πέντε μεταβλητών εξόδου, όπως παρουσιάζονται στον Πίνακα 1. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι τιμές των μεταβλητών εισόδου διεργασίας που μεγιστοποιούν τη συγκέντρωση ξηρής βιομάζας είναι ίδιες με το αντίστοιχο σύνολο τιμών που μεγιστοποιούν τη συγκέντρωση υδατανθράκων (φωτισμός 8800 lm, αερισμός 100 cm³·min⁻¹, CO₂ 25 cm³·min⁻¹, NaNO₃ 750 mg·L⁻¹, αλατότητα 35 g·L⁻¹). Οι συνθήκες λειτουργίας που επιτυγχάνουν αυτή τη μεγιστοποίηση ορίστηκαν ως "Πολιτική Λειτουργίας I". Ομοίως, οι συνθήκες λειτουργίας (φωτισμός 4400 lm, αερισμός 100 cm³·min⁻¹, CO₂ 25 cm³·min⁻¹, NaNO₃ 750 mg·L⁻¹, αλατότητα 0,25 g·L⁻¹) που μεγιστοποιούν τόσο τη συγκέντρωση των πρωτεϊνών, όσο και τη συγκέντρωση ολικών βιοπροϊόντων ονομάστηκαν ως "Πολιτική Λειτουργίας II". Τέλος, οι συνθήκες λειτουργίας (φωτισμός 4400 lm, αερισμός 200 cm³·min⁻¹, CO₂ 50 cm³·min⁻¹, NaNO₃ 750 mg·L⁻¹, αλατότητα 17,5 g·L⁻¹) που μεγιστοποιούν τη συγκέντρωση λιπιδίων ορίστηκαν ως "Πολιτική Λειτουργίας III". Είναι σημαντικό να επισημανθεί ότι μόνο η αύξηση της βιομάζας και η συσσώρευση υδατανθράκων ευνοήθηκαν από το μέγιστο επίπεδο φωτισμού. Σημειώνεται επίσης ότι σε όλες τις περιπτώσεις η βέλτιστη αναλογία ρυθμού παροχής CO₂ προς τον ρυθμό αερισμού ήταν ίση με 1/4 (το κλάσμα όγκου CO₂ στον αέρα ήταν 2,5%). Τέλος, σε κάθε περίπτωση ήταν απαραίτητο η συγκέντρωση πηγής αζώτου να είναι υψηλή ώστε οι συγκεντρώσεις βιομάζας και βιοπροϊόντων να είναι οι μέγιστες δυνατές/

Πίνακας 1. Βέλτιστα επίπεδα, κατάταξη και ποσοστιαία συνεισφορά στη διακύμανση των πέντε μεταβλητών εισόδου της διεργασίας για τις τρεις βέλτιστες πολιτικές.

	Φωτισμός	Αερισμός	CO ₂	NaNO ₃	Αλατότητα
Πολιτική Λειτουργίας I: Μεγιστοποίηση της συγκέντρωσης βιομάζας					
Βέλτιστο επίπεδο	8800 lm	100 cm ³ ·min ⁻¹	25 cm ³ ·min ⁻¹	750 mg·L ⁻¹	35 g·L ⁻¹
Κατάταξη	4	1	2	3	5
Συνεισφορά (%)	12,37	38,26	29,01	13,75	6,61
Πολιτική Λειτουργίας I: Μεγιστοποίηση της συγκέντρωσης υδατανθράκων					
Βέλτιστο επίπεδο	8800 lm	100 cm ³ ·min ⁻¹	25 cm ³ ·min ⁻¹	750 mg·L ⁻¹	35 g·L ⁻¹
Κατάταξη	5	1	2	3	4
Συνεισφορά (%)	4,48	35,48	27,66	19,33	13,05
Πολιτική Λειτουργίας II: Μεγιστοποίηση της συγκέντρωσης πρωτεϊνών					
Βέλτιστο επίπεδο	4400 lm	100 cm ³ ·min ⁻¹	25 cm ³ ·min ⁻¹	750 mg·L ⁻¹	0.25 g·L ⁻¹
Κατάταξη	3	5	4	1	2
Συνεισφορά (%)	7,25	0,78	2,14	69,36	20,47
Πολιτική Λειτουργίας II: Μεγιστοποίηση της συγκέντρωσης ολικών βιοπροϊόντων					
Βέλτιστο επίπεδο	4400 lm	100 cm ³ ·min ⁻¹	25 cm ³ ·min ⁻¹	750 mg·L ⁻¹	0.25 g·L ⁻¹
Κατάταξη	5	2	3	1	4
Συνεισφορά (%)	0,02	33,07	18,32	46,65	1,94
Πολιτική Λειτουργίας III: Μεγιστοποίηση της συγκέντρωσης λιπιδίων					
Βέλτιστο επίπεδο	4400 lm	200 cm ³ ·min ⁻¹	50 cm ³ ·min ⁻¹	750 mg·L ⁻¹	17.5 g·L ⁻¹
Κατάταξη	3	2	1	4	5
Συνεισφορά (%)	25,40	25,77	31,21	10,81	6,81

Η σχετική κατάταξη των πέντε μεταβλητών εισόδου της διεργασίας και η ποσοστιαία τους συνεισφορά στη συνολική διακύμανση κάθε μεταβλητής εξόδου συνοψίζονται επίσης στον Πίνακα 1. Όπως παρατηρείται, ο ρυθμός αερισμού και ο ρυθμός παροχής CO₂ κατατάσσονται αντίστοιχα ως πρώτος και δεύτερος σε σημαντικότητα παράγοντες, όσον αφορά τη συμβολή τους στη συνολική διακύμανση των συγκεντρώσεων βιομάζας και υδατανθράκων, ενώ στην περίπτωση των λιπιδίων, η κατάταξη των δύο παραγόντων αντιστρέφεται. Η αθροιστική συνεισφορά των δύο παραμέτρων στη συνολική διακύμανση για τις συγκεντρώσεις βιομάζας, υδατανθράκων και λιπιδίων είναι 67,27%, 63,14% και 56,98%, αντίστοιχα, υποδεικνύοντας τον κύριο ρόλο των ρυθμών αερισμού και παροχής CO₂ στις συγκεντρώσεις βιομάζας, υδατανθράκων και λιπιδίων. Όταν στόχος ήταν η μεγιστοποίηση των συγκεντρώσεων των πρωτεϊνών και των ολικών βιοπροϊόντων, η λειτουργική παράμετρος που είχε τη μεγαλύτερη συμβολή στη συνολική διακύμανση ήταν η συγκέντρωση NaNO₃. Η αντίστοιχη συνεισφορά της στις πρωτεΐνες και στα ολικά βιοπροϊόντα ήταν ίση με 69,36% και 46,65%, αντίστοιχα. Η δεύτερη σημαντικότερη παράμετρος για τη συγκέντρωση πρωτεϊνών ήταν το επίπεδο αλατότητας του μέσου (με 20,47% συνεισφορά στη συνολική διακύμανση), ενώ για τη συγκέντρωση ολικών βιοπροϊόντων ο ρυθμός αερισμού είχε 33,07% συνεισφορά στην αντίστοιχη τιμή διακύμανσης. Σημειώνεται ότι στα επιλεγμένα επίπεδα διακύμανσης του φωτισμού των καλλιεργειών, η κατάταξη αυτής της παραμέτρου ήταν τρίτη ή χαμηλότερη, αντανακλώντας τη μέτρια επίδραση του στις αποκρίσεις εξόδου της διεργασίας. Ωστόσο, αυτό είναι μόνο ένα πολύ πρώιμο αποτέλεσμα, δεδομένου ότι είναι γνωστό ότι, γενικά, σε χαμηλά επίπεδα φωτισμού (που δεν εφαρμόζονται στην παρούσα μελέτη) η ανάπτυξη των στελεχών μικροφυκών είναι σημαντικά περιορισμένη.

Στη συνέχεια, προσδιορίστηκαν μέσω στατιστικών μοντέλων παλινδρόμησης οι τιμές των μεταβλητών εξόδου για τις τρεις βέλτιστες Πολιτικές Λειτουργίας (Πίνακας 1) και επαληθεύτηκαν με μια σειρά τριών πειραμάτων ασυνεχούς λειτουργίας σε επίπεδο κωνικών φιαλών. Οι μετρούμενες τιμές των μεταβλητών αυτών σε τρία διακριτά χρονικά διαστήματα (κάθε 5 ημέρες) για τις τρεις βέλτιστες Πολιτικές Λειτουργίας καταγράφονται στον Πίνακα 2.

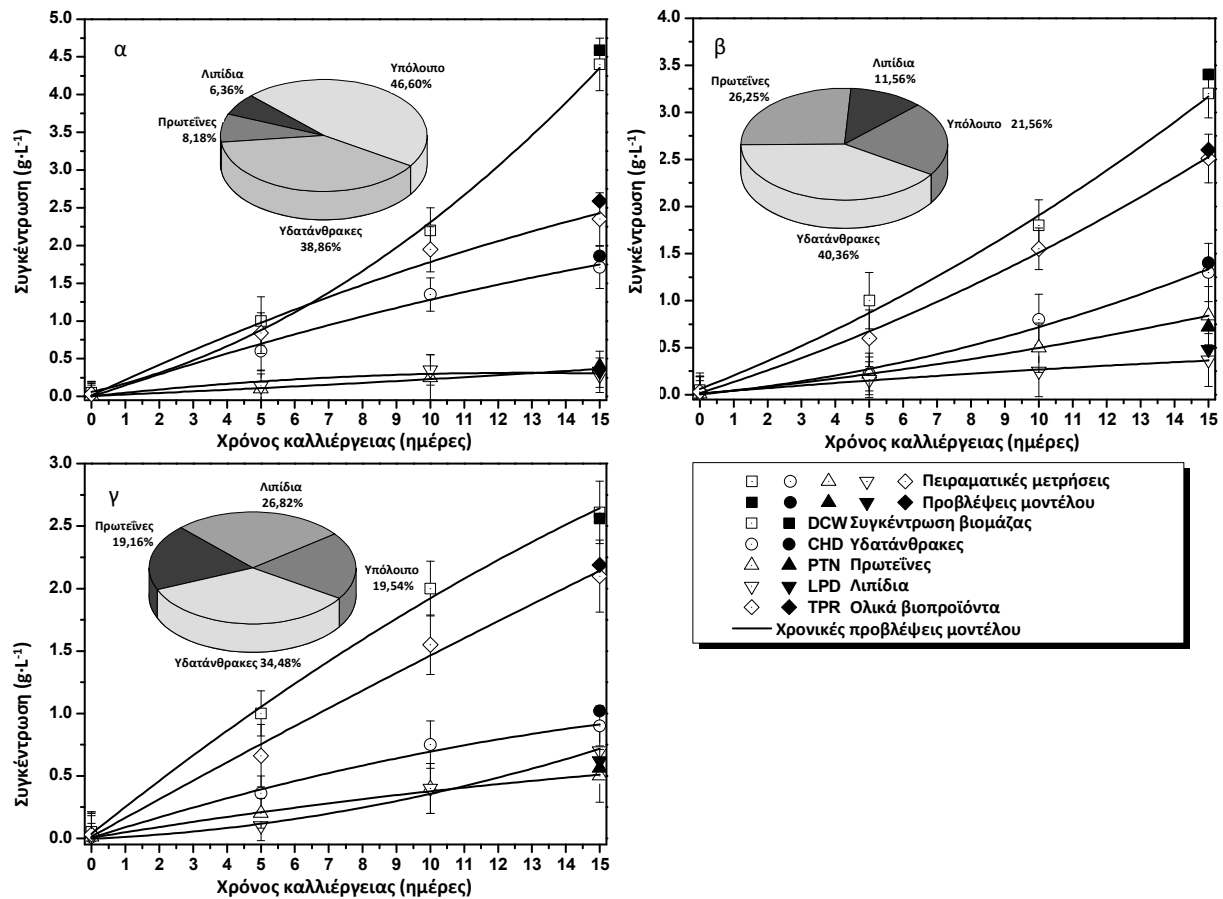
Πίνακας 2. Πειραματικά προσδιορισμένες τιμές των μεταβλητών εξόδου της διεργασίας για τις τρεις βέλτιστες Πολιτικές Λειτουργίας σε ασυνεχή λειτουργία.

Χρόνος (μέρες)	Βιομάζα (g·L ⁻¹)		Υδατάνθρακες (g·L ⁻¹)		Πρωτεΐνες (g·L ⁻¹)		Λιπίδια (g·L ⁻¹)		Ολικά βιοπροϊόντα (g·L ⁻¹)	
	Α	Β	Α	Β	Α	Β	Α	Β	Α	Β
Πολιτική Λειτουργίας I										
5	0,89	1,11	0,57	0,73	0,08	0,12	0,13	0,15	0,78	1,00
10	1,95	2,45	1,24	1,46	0,21	0,29	0,31	0,39	1,76	2,14
15	3,99	4,81	1,53	1,89	0,31	0,41	0,26	0,30	2,10	2,60
Πολιτική Λειτουργίας II										
5	0,92	1,12	0,20	0,24	0,19	0,25	0,15	0,17	0,54	0,66
10	1,58	2,02	0,71	0,89	0,45	0,55	0,23	0,27	1,39	1,71
15	2,83	3,57	1,16	1,44	0,76	0,92	0,32	0,42	2,24	2,78
Πολιτική Λειτουργίας III										
5	0,92	1,08	0,31	0,41	0,17	0,23	0,09	0,11	0,57	0,75
10	1,77	2,23	0,68	0,82	0,36	0,44	0,34	0,46	1,38	1,72
15	2,37	2,85	0,80	1,00	0,46	0,54	0,62	0,78	1,88	2,32

Επίσης, στο Σχήμα 1 παρουσιάζεται το χρονικό προφίλ των συγκεντρώσεων βιομάζας, υδατανθράκων, πρωτεϊνών, λιπιδίων και ολικών βιοπροϊόντων για τις τρεις Πολιτικές Λειτουργίας. Τα πειραματικά δεδομένα (ανοιχτά σύμβολα) συγκρίνονται με τις αντίστοιχες προβλέψεις των στατιστικών μοντέλων (κλειστά σύμβολα) που προέρχονται από τα μοντέλα παλινδρόμησης στο τέλος της περιόδου καλλιέργειας 15 ημερών. Επιπλέον, στο Σχήμα 1 απεικονίζεται η πειραματικά μετρούμενη σύσταση της βιομάζας σε ενδοκυτταρικά προϊόντα στον τελικό χρόνο καλλιέργειας (εσωτερικά διαγράμματα). Όπως παρατηρείται στο Σχήμα 1α (Πολιτική Λειτουργίας I), η συσσώρευση υδατανθράκων ακολούθησε την αύξηση της βιομάζας με τον μέγιστο ρυθμό παραγωγής από όλα τα βιοπροϊόντα. Από την άλλη πλευρά, τα ποσοστά παραγωγής πρωτεϊνών και λιπιδίων μειώθηκαν με την πρόοδο της καλλιέργειας. Από το Σχήμα 1β (Πολιτική Λειτουργίας II) είναι φανερό ότι επιτεύχθηκε η μέγιστη συγκέντρωση ολικών βιοπροϊόντων (2,51 g·L⁻¹) μεταξύ όλων των Πολιτικών Λειτουργίας. Τα αντίστοιχα κλάσματα μάζας σε μεμονωμένα βιοπροϊόντα ήταν: 40,63% σε υδατάνθρακες (1,30 g·L⁻¹), 26,25% σε πρωτεΐνες (0,84 g·L⁻¹) και 11,56% σε λιπίδια (0,37 g·L⁻¹). Ένα εντελώς διαφορετικό δυναμικό προφίλ επιτυγχάνεται στο πλαίσιο της Πολιτικής Λειτουργίας III (Σχήμα 1γ), το οποίος έχει ως αποτέλεσμα τη χαμηλότερη συγκέντρωση βιομάζας και τη μέγιστη περιεκτικότητα σε βιοπροϊόντα, με συγκρίσιμα ποσοστά συσσώρευσης.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η ιδέα ενός βιοδιυλιστηρίου με βάση τα μικροφύκη συνδέεται στενά με την ταυτόχρονη εκμετάλλευση όλων των συστατικών της βιομάζας, με αποτέλεσμα την ταυτόχρονη παραγωγή και αξιοποίηση πολύτιμων βιοπροϊόντων. Σε αυτό το πλαίσιο, η παρούσα μελέτη ανέλυσε τις πολιτικές λειτουργίας και τα χαρακτηριστικά παραγωγής του *Stichococcus* sp., ενός στελέχους που αποτελεί εξαιρετική πηγή υδατανθράκων. Από την άλλη πλευρά, οι συνθήκες καλλιέργειας και οι παράμετροι της διεργασίας που μεγιστοποιούν τη συγκέντρωση των πρωτεϊνών μπορούν να συσχετιστούν με τις συνθήκες και παραμέτρους που μεγιστοποιούν τη συγκέντρωση των ολικών βιοπροϊόντων, ενώ η μεγιστοποίηση της συγκέντρωσης των λιπιδίων απαιτεί μια εντελώς διαφορετική πολιτική λειτουργίας. Η στατιστική ανάλυση και η ανάλυση ευαισθησίας της διεργασίας σε σχέση με την επίδραση των επιλεγμένων παραμέτρων οδήγησε στον εντοπισμό διαφορετικών πολιτικών λειτουργίας για την ενισχυμένη παραγωγή βιομάζας ή/και βιοχημικών. Η στατιστική ανάλυση των πειραματικών αποτελεσμάτων βοήθησε επίσης στην καθοδήγηση της καλλιέργειας και παρέιχε τα μέσα για τη λήψη βέλτιστων αποφάσεων λειτουργίας. Τέλος, οι πληροφορίες που προκύπτουν από αυτή τη μελέτη αναμένεται να υποστηρίξουν την αποτελεσματική κλιμάκωση της καλλιέργειας.



Σχήμα 1. Χρονικό προφίλ των αποκρίσεων της διεργασίας κατά την εφαρμογή των Πολιτικών Λειτουργίας I, II και III. Εσωτερικά διαγράμματα: σύνθεση βιομάζας (% $g \cdot g^{-1}$) στο τέλος της 15^{ης} ημέρας καλλιέργειας.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα εργασία υλοποιήθηκε στα πλαίσια του ερευνητικού έργου «Βιομετατροπή του CO₂ σε Βιοπροϊόντα Υψηλής Αξίας μέσω Αειφόρων Καλλιιεργειών Μικροφυκών – CO₂-BioProducts», και 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).



Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] M. Koller, A. Muhr, G. Braunegg. *Algal Res.* 6 (2014) 52-63.
- [2] R. Slade, A. Bauen. *Biomass Bioenerg.* 53 (2013) 29-38.
- [3] J.A.V. Costa, B.C.B. de Freitas, C.R. Lisboa, T.D. Santos, L.R. de Fraga Brusch, M.G. de Moraes. *Renew. Sust. Energ. Rev.* 99 (2019) 58-65.
- [4] J.H. Duarte, L.S. Fanka, J.A.V. Costa. *Bioresour. Technol.* 214 (2016) 159-165.
- [5] J. Trivedi, M. Aila, D.P. Bangwal, S. Kaul, M.O. Garg. *Renew. Sust. Energ. Rev.* 47 (2015) 295-307.
- [6] C. Crofcheck, A. Shea, M. Montross, M. Crocker, R. Andrews. *J. Biochem. Tech.* 4 (2013) 589-594.
- [7] A. Karapatsia, G. Penloglou, C. Chatzidoukas, C. Kiparissides. *Biomass Bioenerg.* 89 (2016) 123-132.
- [8] G. Penloglou, C. Chatzidoukas, C. Kiparissides. *Comput. Aided Chem. Eng.* 38 (2016) 1731-1736.