

**ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΕΝΟΣ ΛΙΓΝΟΚΥΤΤΑΡΙΝΙΚΟΥ ΒΙΟΔΙΥΛΙΣΤΗΡΙΟΥ ΠΡΟΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΒΙΟΑΙΘΑΝΟΛΗΣ ΚΑΙ ΥΨΗΛΗΣ ΠΡΟΣΤΙΘΕΜΕΝΗΣ ΑΞΙΑΣ ΧΗΜΙΚΩΝ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ****Λ.Π. Χρυσικού, Σ. Μπεζεργιάννη\*, Κ. Κυπαρισσίδης**

Ινστιτούτο Χημικών Διεργασιών και Ενεργειακών Πόρων (ΙΔΕΠ)

Εθνικό Κέντρο Έρευνας και Τεχνολογικής Ανάπτυξης (ΕΚΕΤΑ), Θεσσαλονίκη, Ελλάδα

(\*[sbezerg@cperi.certh.gr](mailto:sbezerg@cperi.certh.gr))**ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Η αλόγιστη χρήση των ορυκτών καυσίμων και η αύξηση της κλιματικής αλλαγής τα τελευταία χρόνια έχουν δημιουργήσει την ανάγκη αναζήτησης νέων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Τα σύγχρονα βιοδιυλιστήρια αξιοποίησης λιγνοκυτταρινικής βιομάζας για τη συμπαγωγή βιοαιθανόλης και υψηλής προστιθέμενης αξίας χημικών προϊόντων συγκεντρώνουν συνεχώς το ερευνητικό ενδιαφέρον. Η παρούσα εργασία έχει ως σκοπό την αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων ενός βιοδιυλιστηρίου συμπαγωγής βιοαιθανόλης και ηλεκτρικού οξέος χρησιμοποιώντας ως πρώτη ύλη το πολυετές ποώδες αγρωστώδες φυτό *Phalaris aquatica* L. (κοινή ονομασία: Φαλαρίδα η βολβόριζος) μέσω της μεθόδου της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (ΑΚΖ). Η συγκεκριμένη μελέτη ΑΚΖ αποσκοπεί στην ποσοτικοποίηση των εκπομπών των θερμοκηπικών αερίων (Greenhouse gas emissions) και της ενεργειακής απόδοσης του εξεταζόμενου βιοδιυλιστηρίου, θεωρώντας όλα τα στάδια παραγωγής της λιγνοκυτταρινικής βιομάζας και της μετατροπής της σε βιοαιθανόλη και ηλεκτρικό οξύ. Γι' αυτό και διαμορφώθηκαν τρία σενάρια για τον προσδιορισμό των περιβαλλοντικών χαρακτηριστικών του βιοδιυλιστηρίου λαμβάνοντας υπόψη διαφορετικά χαρακτηριστικά καλλιέργειας της *Phalaris aquatica* L. Με βάση τα αποτελέσματα της μελέτης προέκυψε ότι οι εκπομπές των θερμοκηπικών αερίων διέφεραν ανάλογα με το εξεταζόμενο σενάριο, αναδεικνύοντας τις σημαντικές επιδράσεις της καλλιέργειας της βιομάζας και των γεωργικών εισροών, με βάση τις εκάστοτε τοπικές κλιματικές συνθήκες. Ειδικότερα, οι προσδιοριζόμενες εκπομπές αερίων θερμοκηπίου παραγωγής της βιοαιθανόλης κυμάνθηκαν μεταξύ 31.67-38.12 g CO<sub>2</sub>eq/MJ, ενώ οι αντίστοιχες εκπομπές παραγωγής ηλεκτρικού οξέος κυμάνθηκαν μεταξύ 58.74 – 193.2 g CO<sub>2</sub>eq/MJ. Επιπρόσθετα, οι ενεργειακές εκπομπές βρέθηκε ότι συνεισέφεραν σημαντικά στις εκπομπές των θερμοκηπικών αερίων, με βάση το χρησιμοποιούμενο μείγμα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα. Συνεπώς, από την παρούσα μελέτη προέκυψε ότι η *Phalaris aquatica* L. αποτελεί μία πολλά υποσχόμενη πηγή λιγνοκυτταρινικής βιομάζας προς αειφόρα συστήματα βιοδιυλιστηρίων.

**ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Η αλόγιστη και συστηματική εξάντληση των ορυκτών πηγών ενέργειας αποτέλεσε το εφελτήριο για την αναζήτηση νέων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, αξιοποιώντας τη λιγνοκυτταρινική βιομάζα για την παραγωγή εναλλακτικών βιοκαυσίμων. Τα λιβαδικά φυτά αποτελούν μια άφθονη και ανανεώσιμη πρώτη ύλη λιγνοκυτταρινικής βιομάζας και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή βιοενέργειας [1]. Στα φυτά αυτά, συγκαταλέγονται ενδημικά αυτοφυή είδη, όπως είναι τα πολυετή ποώδη είδη και ειδικότερα αυτά των αγρωστωδών και των ψυχανθών, τα οποία έχουν την ικανότητα να προσαρμόζονται σε περιοχές με περιορισμένους πόρους αύξησης, γι' αυτό απαντώνται σε μεγάλο εύρος κλιματεδαφικών συνθηκών. Επιπλέον τα είδη των πολυετών αγρωστωδών εμφανίζουν υψηλότερη παραγωγή βιομάζας και συγκέντρωση λιγνοκυτταρίνης ανά μονάδα επιφάνειας σε σχέση με τα ψυχανθή είδη και έχουν την ικανότητα να προσαρμόζονται στις ξηροθερμικές συνθήκες της χαμηλής ζώνης βλάστησης [2]. Το λιβαδικό φυτό φαλαρίδα (κοινή ονομασία: φαλαρίδα η βολβόριζος) (*Phalaris aquatica* L.), το οποίο είναι ένα πολυετές αγρωστώδες (Εικόνα 1) εμφανίζει υψηλή παραγωγή βιομάζας (> 15 tn ha<sup>-1</sup> Ξ.Ο), υψηλή

συγκέντρωση σε συνολικούς δομικούς πολυσακχαρίτες (> 700 g Kg<sup>-1</sup> Ξ.Ο) και χαμηλή συγκέντρωση σε λιγνίνη (< 10 g Kg<sup>-1</sup> Ξ.Ο). Επιπλέον το συγκεκριμένο είδος παρουσιάζει ευκολία εγκατάστασης με σπόρους σε γεωργικές εκτάσεις, μεγάλη διάρκεια ζωής (>10 έτη), σταθερότητα παραγωγής σε διάφορα κλιματεδαφικά περιβάλλοντα και αειφορία κατά την παραγωγή της λιγνοκυτταρινικής βιομάζας (δέσμευση ατμοσφαιρικού CO<sub>2</sub> και ανακύκλωση θρεπτικών στοιχείων) [2].



Εικόνα 1. Καλλιέργειες της *Phalaris aquatica* L.

Στο πλαίσιο του έργου Λιγνοφος μελετήθηκε η αειφόρος παραγωγή βιοκαυσίμων και υψηλής προστιθέμενης αξίας βιοχημικών προϊόντων στο πλαίσιο ενός βιοδιυλιστηρίου μέσω βιοχημικής κατεργασίας της λιγνοκυτταρινικής βιομάζας της *Phalaris aquatica* L. Λαμβάνοντας υπόψη ότι πρωταρχική προτεραιότητα κάθε νέας παραγωγικής διαδικασίας αποτελεί η αξιολόγηση του περιβαλλοντικού της αποτυπώματος, ποσοτικοποιήθηκαν οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις της προτεινόμενης τεχνολογίας μέσω της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (ΑΚΖ). Η μέθοδος της ΑΚΖ αποτελεί ένα χρήσιμο εργαλείο για την καταγραφή και την ανάλυση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής ενός προϊόντος ή/και μίας διεργασίας.

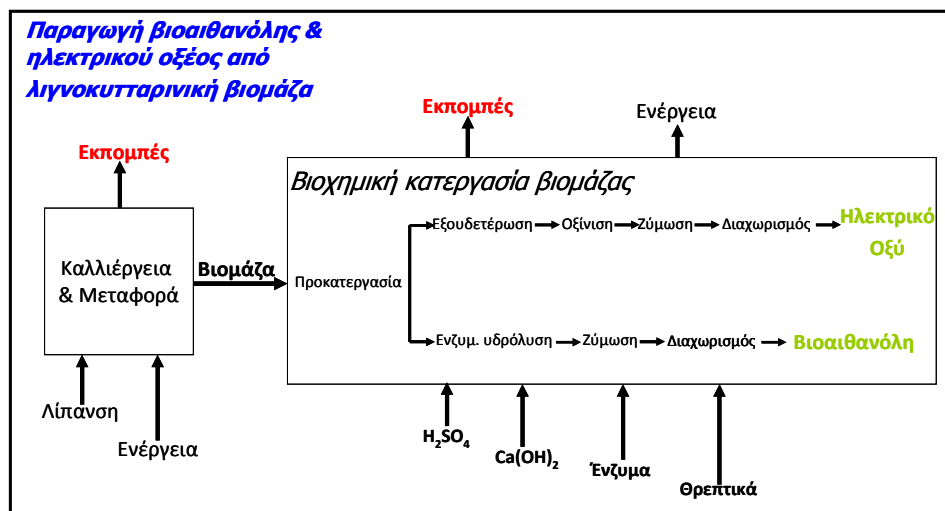
Η παρούσα εργασία αποσκοπεί στην αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων ενός λιγνοκυτταρινικού βιοδιυλιστηρίου συμπαραγωγής βιοαιθανόλης και υψηλής προστιθέμενης αξίας χημικών προϊόντων από λιγνοκυτταρινική βιομάζα.

### ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Το προτεινόμενο βιοδιυλιστήριο θεωρήθηκε ότι βρίσκεται στην Ελλάδα, με δυναμικότητα ετήσιας παραγωγής 90.000 τόνους βιοαιθανόλης και 9.000 τόνους ηλεκτρικού οξέας. Με βάση τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της *Phalaris aquatica* L., που προαναφέρθηκαν η παρούσα εργασία επικεντρώθηκε στις καλλιεργητικές πρακτικές σχετικά με την απόδοση της βιομάζας και τις ανάγκες λίπανσης εξετάζοντας τρία σενάρια. Το σενάριο 1 θεωρεί μία άριστα καλλιεργημένη έκταση, με χρήση φυτοφαρμάκων σε κοντινή απόσταση από το βιοδιυλιστήριο, το σενάριο 2 θεωρεί μία εξίσου άρτια καλλιεργημένη έκταση χωρίς χρήση φυτοφαρμάκων σε επίσης κοντινή απόσταση από το βιοδιυλιστήριο, ενώ στο 3<sup>ο</sup> σενάριο η καλλιέργεια βρίσκεται σε μία απομονωμένη περιοχή σε υψόμετρο και δεν εφαρμόζεται φυτοπροστασία. Τα εξεταζόμενα σενάρια στηρίχθηκαν στην υψηλή απόδοση της *Phalaris aquatica* L. με μικρές απαιτήσεις σε φυτοφάρμακα αποσκοπώντας στη σύγκριση της καλλιέργειας σε περιοχές με διαφορετικό υψόμετρο, καταλήγοντας σε μία ολιστική προσέγγιση ενός λιγνοκυτταρινικού βιοδιυλιστηρίου στην Ελλάδα [3].

Τα όρια του εξεταζόμενου βιοδιυλιστηρίου συμ-παραγωγής βιοαιθανόλης και ηλεκτρικού οξέος δίνεται στο Σχήμα 1 και περιλαμβάνουν δύο επιμέρους υποσυστήματα, την παραγωγή της βιομάζας (καλλιέργεια και μεταφορά προς το βιοδιυλιστήριο) καθώς και τη βιοχημική κατεργασία της προς βιοαιθανόλη και ηλεκτρικό οξύ. Πιο συγκεκριμένα η ολοκληρωμένη μετατροπή της λιγνοκυτταρινικής βιομάζας σε βιοκαύσιμα και χημικά προϊόντα υψηλής προστιθέμενης αξίας μέσω της βιοχημικής κατεργασίας της περιλαμβάνει αρχικά την προκατεργασία της βιομάζας (ξήρανση, τεμαχισμός, όξινη υδρόλυση και διαχωρισμός υγρού/στερεού). Η βιομάζα μετά την ξήρανση και τον τεμαχισμό κατεργάστηκε με οξέα και ατμό για τη μετατροπή της ημικυτταρίνης

σε σάκχαρα, ενώ μέσω ενός διαχωρισμού στερού/υγρού απομακρύνθηκε η κυτταρίνη (στερεά) από τα διαλυτά σάκχαρα. Στη συνέχεια η κυτταρίνη μετατράπηκε σε βιοαιθανόλη μέσω μίας βιοχημικής διεργασίας τριών σταδίων (ενζυμική υδρόλυση, ζύμωση, διαχωρισμός), ενώ τα διαλυτά σάκχαρα μετατράπηκαν σε ηλεκτρικό οξύ, μέσω μίας διεργασίας τεσσάρων σταδίων (εξουδετέρωση, οξίνιση, ζύμωση, διαχωρισμός). Η λιγνίνη και τα στερεά υπολείμματα χρησιμοποιήθηκαν για την παραγωγή ενέργειας (ηλεκτρισμός και ατμός) καλύπτοντας σημαντικό μέρος των ενεργειακών απαιτήσεων του βιοδιυλιστηρίου. Επιπρόσθετα, το παραγόμενο CO<sub>2</sub> από τη ζύμωση των μονομερών σακχάρων προς βιοαιθανόλη, χρησιμοποιήθηκε κατά τη ζύμωση των σακχάρων προς παραγωγή του ηλεκτρικού οξέος [3].



**Σχήμα 1.** Όρια του εξεταζόμενου συστήματος παραγωγής βιοαιθανόλης και ηλεκτρικού οξέος από *Phalaris aquatica* L.

Τα απαιτούμενα δεδομένα για τη μελέτη της ΑΚΖ προέρχονται από πραγματικά πειραματικά δεδομένα, βιβλιογραφικές πηγές κ.ά, ενώ δεδομένα ανακτήθηκαν και από το μοντέλο Gemis (Global Emission Model for Integrated System, έκδοση 4.9), ενισχύοντας την ακρίβεια των αποτελεσμάτων και συγκεκριμένα τις εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου (Greenhouse Gas Emissions, GHG) εκφρασμένες σε ισοδύναμα CO<sub>2</sub> (CO<sub>2</sub>-eq).

## ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Τα αποτελέσματα των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των προϊόντων των δύο εξεταζόμενων διεργασιών παρατίθενται στον Πίνακα 1 και όπως προκύπτει οι εκπομπές GHG παραγωγής της βιοαιθανόλης ήταν 38.12, 32.08 και 31.67 g CO<sub>2</sub> eq/MJ για τα σενάρια 1,2 και 3, αντίστοιχα.

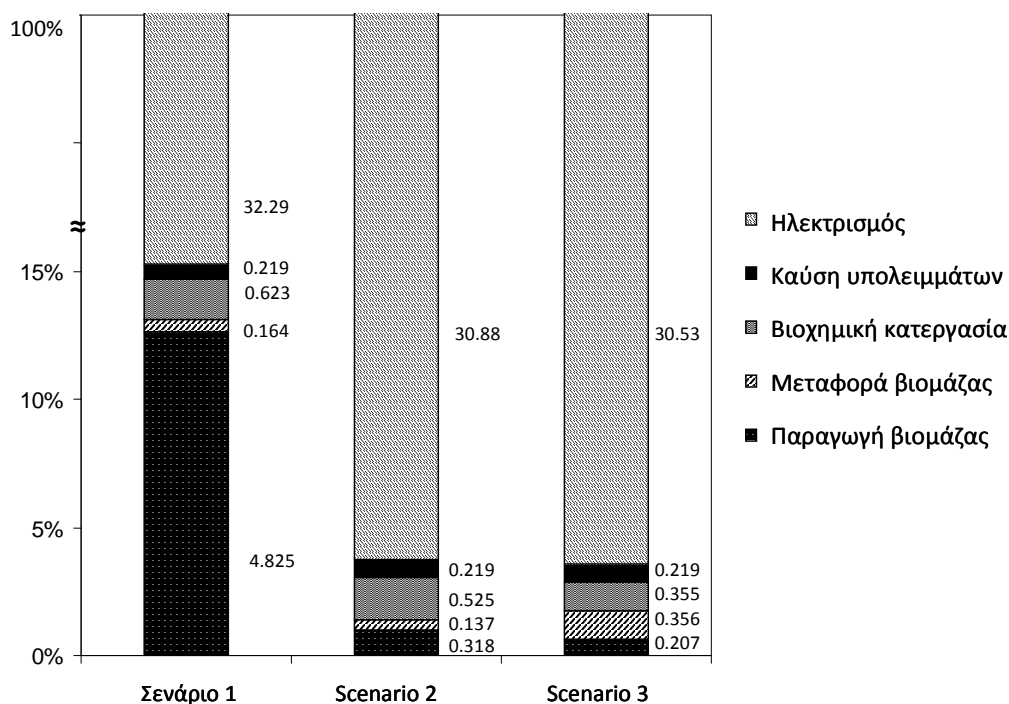
Πιο συγκεκριμένα, στο σενάριο 1 οι εκπομπές GHG ήταν υψηλότερες σε σύγκριση με τα άλλα σενάρια λόγω της χρήσης φυτοφαρμάκων κατά την καλλιέργεια της βιομάζας. Παρομοίως, οι διαφορές στις εκπομπές GHG κατά τη συλλογή και τη μεταφορά της βιομάζας μεταξύ των σεναρίων 2 και 3 αποδίδονται στη χρήση των φυτοφαρμάκων. Το σενάριο 3 φαίνεται να υπερτερεί περιβαλλοντικά, λαμβάνοντας ωστόσο υπόψη ότι πρόκειται για μία μακροχρόνια καλλιέργεια, με συνέπειες στην ενδεχόμενη εμπορική της εφαρμογή. Επιπρόσθετα, με βάση τα αποτελέσματα, μία τέτοια καλλιέργεια θα μπορούσε ενδεχομένως να παρέχει περιστασιακά επιπλέον βιομάζα στις περιπτώσεις μελέτης όπως παρουσιάζονται στα σενάρια 1 και 2. Συνεπώς, το βιοδιυλιστήριο του σεναρίου 2 προκύπτει ότι έχει το μικρότερο περιβαλλοντικό αποτύπωμα, θεωρώντας την απόδοση της βιομάζας χωρίς καλλιεργητικές εισροές και το χρόνο ανάπτυξής τους. Οι εκπομπές GHG που προσδιορίστηκαν είναι συγκρίσιμες με τις τιμές που αναφέρονται στη βιβλιογραφία για βιοδιυλιστήρια βιοαιθανόλης διαφόρων ειδών λιγνοκυτταρινικής βιομάζας και/ή αγροτικών υπολειμμάτων (15–123g CO<sub>2</sub> eq/MJ) [4,5].

**Πίνακας 1.** Εκπομπές GHG της παραγωγής βιοαιθανόλης (g CO<sub>2</sub> eq-/MJ) και ηλεκτρικού οξέος (g CO<sub>2</sub> eq-/kg προϊόντος)

Στάδιο εξεταζόμενης διεργασίας	Βιοαιθανόλη			Ηλεκτρικό οξύ		
	Σενάριο 1	Σενάριο 2	Σενάριο 3	Σενάριο 1	Σενάριο 2	Σενάριο 3
Παραγωγή βιομάζας	4.990	0.455	0.563	110.2	12.07	
Καλλιέργεια	4.443			127.9		
Συλλογή	0.382	0.318	0.207	10.13	8.439	2.616
Μεταφορά	0.164	0.137	0.356	4.352	3.627	9.430
Βιοδιυλιστήριο	33.13	31.63	31.10	60.97	55.68	46.43
Βιοχημική κατεργασία	0.623	0.525	0.355	43.11	27.66	36.03
Ηλεκτρισμός	32.29	30.88	30.53	17.84	15.13	10.38
Καύση υπολειμμάτων	0.219	0.219	0.219	0.022	0.022	0.022
Σύνολο	38.12	32.08	31.67	193.2	67.75	58.47

Εντούτοις, στο σημείο αυτό κρίνεται σκόπιμο να αναφερθεί ότι η σύγκριση των αποτελεσμάτων μελετών LCA αξιολόγησης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων παραγωγής βιοαιθανόλης από λιγνοκυτταρινική βιομάζα είναι σχετικά περιορισμένη και περίπλοκη λαμβάνοντας υπόψη παραμέτρους όπως οι τοπικές καλλιεργητικές συνθήκες, οι βιοχημικές διεργασίες, οι ενεργειακές καταναλώσεις του βιοδιυλιστηρίου κ.ά. [3].

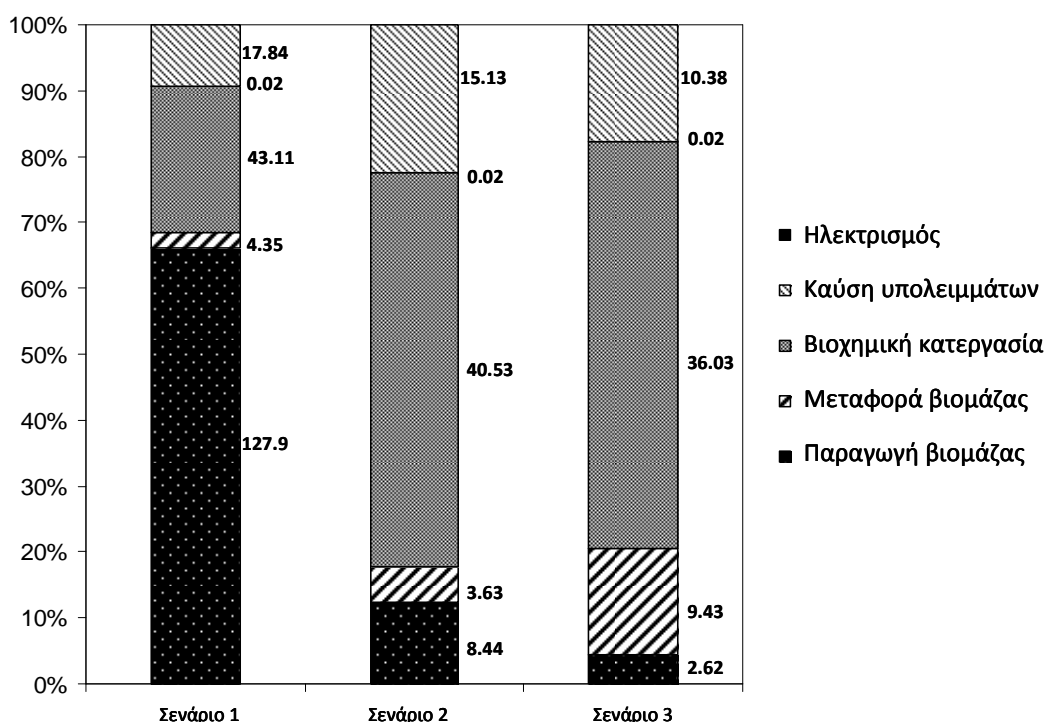
Στο Σχήμα 2 απεικονίζεται η συνεισφορά των επιμέρους διεργασιών στις συνολικές GHG παραγωγής βιοαιθανόλης.

**Σχήμα 2.** Συνεισφορά των επιμέρους διεργασιών στις συνολικές εκπομπές GHG παραγωγής βιοαιθανόλης (οι απόλυτες τιμές δίνονται σε g CO<sub>2</sub> eq/MJ).

Συγκεκριμένα, στο σενάριο 1 οι εκπομπές της κατανάλωσης ηλεκτρισμού αντιπροσωπεύουν ~84.7% των συνολικών εκπομπών GHG, ενώ η συλλογή της βιομάζας και οι εκπομπές που οφείλονται στη μεταφορά της ~13.1%, αντίστοιχα. Ομοίως, στο σενάριο 2 η υψηλότερη συνεισφορά των επιμέρους διεργασιών στις συνολικές GHG εκπομπές παραγωγής βιοαιθανόλης συνδέθηκε με τις ενεργειακές εκπομπές. Στο σενάριο 3 σημαντική είναι η συνεισφορά των εκπομπών μεταφοράς της βιομάζας στο συνολικό ανθρακικό αποτύπωμα παραγωγής της

βιοαιθανόλης, λόγω της θέσης της καλλιέργειας. Αξιοσημείωτη είναι και σε αυτό το σενάριο η συνεισφορά των ενεργειακών εκπομπών της .

Επιπρόσθετα, οι εκπομπές GHG παραγωγής ηλεκτρικού οξέος όπως φαίνεται στον Πίνακας 1 ήταν 193.2g CO<sub>2</sub> eq/kg, 67.75 και 58.47g CO<sub>2</sub> eq/kg για τα σενάρια 1, 2 και 3, αντίστοιχα. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων αυτών με άλλων βιοδιυλιστηρίων δεν είναι δυνατή, λόγω της έλλειψης σχετικών βιβλιογραφικών δεδομένων. Οι υψηλότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις παραγωγής ηλεκτρικού οξέος προέρχονται από το στάδιο της καλλιέργειας (66.19%) στο σενάριο 1. Στα σενάρια 2 και 3 αναδείχθηκε η βιοχημική μετατροπή της βιομάζας ως η διεργασία με την υψηλότερη συνεισφορά στις συνολικές εκπομπές GHG παραγωγής ηλεκτρικού οξέος (~60%).



**Σχήμα 3.** Συνεισφορά των επιμέρους διεργασιών στις συνολικές εκπομπές GHG παραγωγής ηλεκτρικού οξέος (οι απόλυτες τιμές δίνονται σε g CO<sub>2</sub> eq/kg).

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σκοπός της παρούσας εργασίας ήταν η αξιολόγηση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος ενός βιοδιυλιστηρίου συμ-παραγωγής βιοαιθανόλης και ηλεκτρικού οξέος από *Phalaris aquatica* L.. Για το σκοπό αυτό εξετάστηκαν τρία διαφορετικά σενάρια, θεωρώντας διαφορετικές καλλιέργειες που είχαν ως αποτέλεσμα διαφορετικές αποδόσεις της εξεταζόμενης λιγνοκυτταρινικής βιομάζας. Οι εκπομπές παραγωγής της βιοαιθανόλης κυμάνθηκαν από 31.67 έως 38.12 g CO<sub>2</sub> eq/MJ και του ηλεκτρικού οξέος από 58.74 έως 193.2 g CO<sub>2</sub> eq/kg. Η ανάπτυξη της εξεταζόμενης βιομάζας σε μία άριστα εγκατεστημένη καλλιέργεια κατά το σενάριο 2, αναδείχθηκε ως περιβαλλοντικά φιλικότερη σε σχέση με τα άλλα σενάρια, καταλήγοντας σε χαμηλές εκπομπές GHG. Επιπλέον, από τα αποτελέσματα προέκυψε ότι η καλλιέργεια της *Phalaris aquatica* L. συμβάλλει καταλυτικά στη μείωση της κλιματικής αλλαγής, αναδεικνύοντας παράλληλα την εξάρτησή της από τις τοπικές κλιματικές συνθήκες.

Στο εξεταζόμενο διυλιστήριο διαπιστώθηκε η υψηλή συνεισφορά των ενεργειακών εκπομπών στις συνολικές εκπομπές GHG. Γι' αυτό και το περιβαλλοντικό του προφίλ θα μπορούσε να βελτιωθεί περισσότερο αυξάνοντας την ενεργειακή αυτονομία του βιοδιυλιστηρίου.

Συμπερασματικά, η μελέτη αυτή ανέδειξε τα σημαντικά περιβαλλοντικά πλεονεκτήματα αξιοποίησης της *Phalaris aquatica* L. μέσω ενός βιοδιυλιστηρίου συμπαραγωγής βιοαιθανόλης και ηλεκτρικού οξέος.

Οι βιβλιογραφικές αναφορές θα πρέπει να παρουσιάζονται στο κείμενο σύμφωνα με το ακόλουθο πρότυπο αναφορών<sup>[1-3, 4]</sup>.

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα εργασία υλοποιήθηκε στο πλαίσιο του έργου «Αειφόρος Παραγωγή Βιοκαυσίμων και Υψηλής Προστιθέμενης Αξίας Βιοχημικών Προϊόντων από Λιγνοκυτταρινική Βιομάζα (ΛΙΓΝΟΦΟΣ)», 09ΣΥΝ-32-434, και συνχρηματοδοτήθηκε από το Ελληνικό Κράτος και την Ευρωπαϊκή Ένωση.



## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] I. Pappas, Z. Koukoura, C. Goulas, C. Kiparissides, Ch. Tananaki. *Grassland. Sci. Eur.* 14 (2009) 425-427.
- [2] I. Α. Παππάς. Διδακτορική Διατριβή, Σχολή Δασολογίας και Φυσικού Περιβάλλοντος, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, (2010).
- [3] L.P. Chrysikou, S. Bezergianni, C. Kiparrisides. *SETA* 28 (2018) 103-109.
- [4] JRC Technical Reports Well-to-Tank Appendix 4-Version 4.0, 2013a. Description, results and input data per pathway. WTT pathways Ethanol, Ispra, Italy.
- [5] M. Morales, J. Quintero, R. Conejeros, G. Aroca. *Renew Sustain Energy Rev* 42 (2015) 1349–1361.