



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Ταμείο
Περιφερειακής Ανάπτυξης

ΕΠΑνεΚ 2014-2020
ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ
ΑΝΤΑΓΩΝΙΣΤΙΚΟΤΗΤΑ
ΕΠΙΧΕΙΡΗΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑ
ΚΑΙΝΟΤΟΜΙΑ



Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΓΕΩΠΟΝΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ
AGRICULTURAL UNIVERSITY OF ATHENS



1^ο Newsletter VF2FARM - Τ2ΕΔΚ-02663

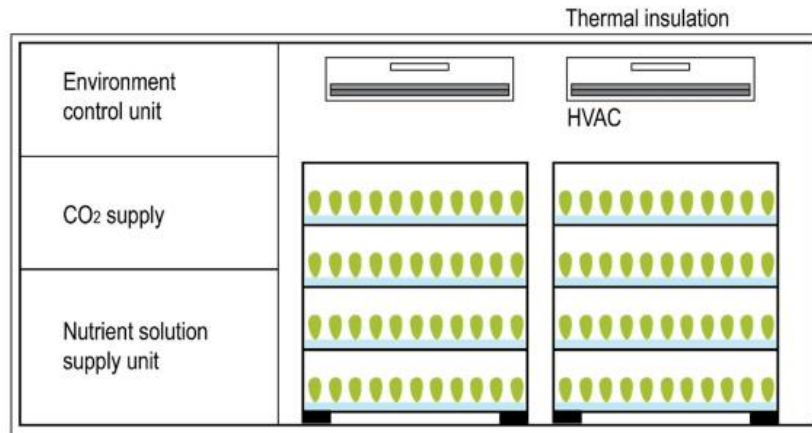
Ανάλυση Κύκλου Ζωής σε συστήματα κάθετης καλλιέργειας- Vertical Farms

Δρ. Δάφνη Αυγουστάκη, Μεταδιδακτορική Ερευνήτρια, Εργαστήριο Γεωργικών Κατασκευών, Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών

Τα εσωτερικά κάθετα αγροκτήματα (VF) έχουν επεκταθεί ταχέως τα τελευταία χρόνια ως μια προσέγγιση για την εξασφάλιση ανθεκτικής παροχής τροφίμων σε αστικές περιοχές. Η βιωσιμότητα συχνά προωθείται από τις κάθετες φάρμες, εστιάζει κυρίως σε μετρήσεις σε επίπεδο αγροκτήματος και πληροφορίες σχετικά με την εργασία με τη συσκευασία. Ωστόσο, υπάρχουν λίγες αξιολογήσεις για τις επιπτώσεις που έχουν οι VF σε όλο τον κύκλο ζωής τους, εν μέρει λόγω της καινοτομίας του κλάδου. Αυτό το κείμενο στοχεύει να παράσχει πληροφορίες και καθοδήγηση σχετικά με τη διεξαγωγή μιας αξιολόγησης περιβαλλοντικής βιωσιμότητας μιας μεθοδολογίας αξιολόγησης του κύκλου ζωής των VF (LCA). Σε όλο το κείμενο, περιγράφονται οι διάφορες φάσεις ενός κύκλου ζωής και παρέχονται οδηγίες για τους επαγγελματίες προκειμένου να βοηθήσουν την εργασία, τις υποθέσεις και τις μεθοδολογικές επιλογές τους. Επιπλέον, παρέχονται σημαντικές διαδικασίες και γνώσεις από προηγούμενες έρευνες για την προώθηση μιας πιο βιώσιμης βιομηχανίας κάθετης καλλιέργειας.

Οι VF είναι σχετικά νέες στο πλαίσιο των αλυσίδων εφοδιασμού τροφίμων, και ως εκ τούτου είναι ένα διευρυμένο αντικείμενο έρευνας. Ένα μεγάλο μέρος της επιστημονικής και γκριζας βιβλιογραφίας προωθεί την κάθετη γεωργία ως βιώσιμη λύση για την παροχή τροφίμων. Ωστόσο, οι εκτιμήσεις των περιβαλλοντικών επιπτώσεων της εξωσωματικής γονιμοποίησης παραμένουν περιορισμένες στην επιστημονική βιβλιογραφία, με λίγες περιπτώσεις που εφαρμόζουν συστηματικές περιβαλλοντικές εκτιμήσεις (Dorr et al., 2021; Martin and Molin, 2019; Martin et al., 2022; Romeo et al., 2018) . Ένας

αριθμός θεωρητικών μελετών έχει αξιολογήσει τις εξωσωματικές γονιμοποιήσεις για να συγκρίνουν την απόδοσή τους έναντι ανταγωνιστικών συστημάτων όπως η παραγωγή σε ανοιχτό πεδίο και τα θερμοκήπια, βλ. π.χ. Οι Graamans et al. (2018) και Weidner et al. (2021, 2022). Ωστόσο, στη βιβλιογραφία λείπουν εμπειρικά στοιχεία από πραγματικές περιπτώσιολογικές μελέτες, κάτι που μπορεί να οφείλεται εν μέρει στην καινοτομία και την εξελισσόμενη φύση τους. Ως εκ τούτου, υπάρχουν λίγες μελέτες που επικυρώνουν τους ισχυρισμούς της κάθετης γεωργίας σχετικά με την αποδοτικότητα των πόρων και τις μειωμένες περιβαλλοντικές επιπτώσεις, οι οποίες συχνά εστιάζονται κυρίως στις μετρήσεις σε επίπεδο αγροκτήματος.

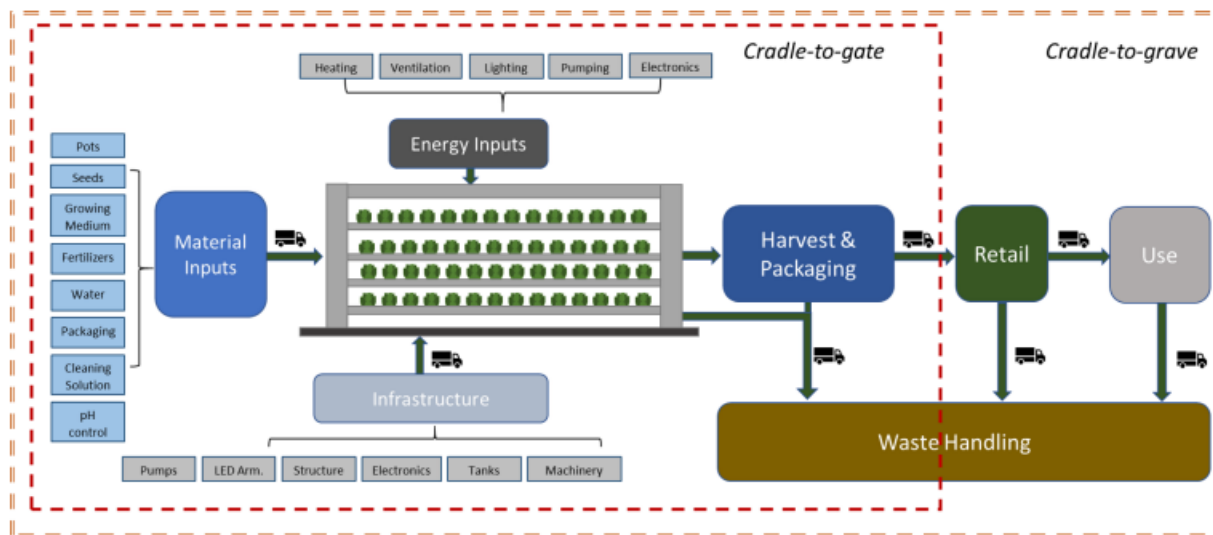


Σχήμα 1: Διαμόρφωση ενός εσωτερικού κάθετου αγροκτήματος που αποτελείται από τα κύρια στοιχεία (από τον Eero Hallikainen, 2018).

Οι καταναλωτές, οι επιχειρήσεις και οι υπεύθυνοι λήψης αποφάσεων γίνονται όλο και πιο προσεκτικοί στη χρήση ανατροφοδότησης και πληροφοριών μέσω αξιόπιστων συστημάτων για την επικοινωνία και την αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων αγαθών και υπηρεσιών. Συγκεκριμένα, ο τομέας των τροφίμων χρησιμοποιεί ολοένα και περισσότερο την αξιολόγηση του κύκλου ζωής (LCA) για να τονίσει το «αποτύπωμα» των προϊόντων τους (Freidberg, 2014). Η χρήση LCA μπορεί να είναι μια σημαντική μεθοδολογία για τις VF για να ανταποκριθούν στην κριτική πολλών από τους ισχυρισμούς στον κλάδο και να παρέχουν γνώσεις για τη συνεργασία με τη βιωσιμότητα πιο στρατηγικά, παρέχοντας διαφανείς και επιστημονικά βασισμένες μετρήσεις. Αυτό το κεφάλαιο στοχεύει να παρέχει πληροφορίες σχετικά με τη διεξαγωγή μιας αξιολόγησης περιβαλλοντικής βιωσιμότητας μιας εξωσωματικής γονιμοποίησης που χρησιμοποιεί μεθοδολογία LCA και σκιαγραφεί σημαντικά ζητήματα κατά τη διάρκεια της διαδικασίας. Το κείμενο αυτό έχει σχεδιαστεί για να παρέχει μια επισκόπηση της μεθόδου και στη συνέχεια περιγράφει τις διάφορες φάσεις διεξαγωγής μιας μεθόδου LCA, παρέχοντας οδηγίες ειδικά για τις κάθετες καλλιέργειες συγκριτικά και με άλλα συστήματα καλλιέργειας. Συμπεριλαμβάνει επίσης την περιγραφή των περιορισμών της χρήσης LCA και παρέχει γνώσεις σχετικά με τις προκλήσεις, τις σημαντικές πτυχές και τις δυνατότητες βελτίωσης της περιβαλλοντικής απόδοσης των VF με βάση προηγούμενες έρευνες. Η μεθοδολογία και οι γνώσεις είναι εφαρμόσιμες σε διαφορετικές μορφές συστημάτων VF. Αυτό περιλαμβάνει αξιολογήσεις, για παράδειγμα, της παραγωγής βρώσιμων καλλιεργειών, μανιταριών και παραγωγής καλλιεργειών για άλλους σκοπούς (π.χ. φαρμακευτικές εφαρμογές).

Η Ανάλυση Κύκλου Ζωής (Life Cycle Analysis – LCA) είναι μια ευρέως χρησιμοποιούμενη και αποδεκτή μέθοδος στην οποία ποσοτικοποιούνται και απεικονίζονται οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις που σχετίζονται με ένα σύστημα προϊόντος ή υπηρεσίας κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής του, δηλαδή από την εξόρυξη των πρώτων υλών μέσω των φάσεων παραγωγής και χρήσης έως τη διαχείριση των αποβλήτων και τη μεταφορά (Finnveden et al., 2009). Η μέθοδος χρησιμοποιείται εδώ και αρκετές δεκαετίες και μάλιστα έχει τυποποιηθεί από τον Διεθνή Οργανισμό Τυποποίησης (ISO, 2006). Χρησιμοποιείται από τους οργανισμούς για τον εντοπισμό των λεγόμενων "καυτών σημείων" στον κύκλο ζωής τους, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη βελτίωση των διαδικασιών και τη λήψη στρατηγικών αποφάσεων σχετικά με την καλύτερη πορεία δράσης για βελτίωση. Η LCA παρέχει επίσης πληροφορίες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την επισήμανση και τη λήψη αποφάσεων. σύμφωνα με το ISO 14044 (2006), η διαδικασία διεξαγωγής μιας LCA βασίζεται σε τέσσερα απαιτούμενα βήματα (που αναφέρονται επίσης ως φάσεις), όπως (1) καθορισμός του στόχου και του πεδίου εφαρμογής, (2) ανάλυση απογραφής, (3) εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων και (4) ερμηνεία των αποτελεσμάτων με εφαρμογή στην LCA στα VF. Η εικόνα 1. Περιγράφει τα όρια του συστήματος που συμπεριλήφθηκαν και ποια όχι για το σχεδιασμό της διάταξης, έτσι ώστε να παρέχει μια επισκόπηση της μεθόδου και, στη συνέχεια, να περιγράφει τις διάφορες φάσεις της διενέργειας μιας LCA, παρέχοντας καθοδήγηση ειδικά για τις κάθετες φάρμες.

Επίσης, παρουσιάζονται οι περιορισμοί της εφαρμογής της LCA και παρέχονται γνώσεις σχετικά με τις προκλήσεις, τις σημαντικές πτυχές και τις δυνατότητες βελτίωσης των περιβαλλοντικών επιδόσεων των VF με βάση προηγούμενες έρευνες. Η μεθοδολογία και οι γνώσεις είναι εφαρμόσιμες σε διάφορες μορφές VF.



Εικόνα 1. Όρια του συστήματος για την αξιολόγηση του κύκλου ζωής ενός VF συστήματος, συμπεριλαμβανομένων των εισροών και των εκροών του συστήματος. Με βάση τους Martin et al. (2022)

1. Εισροές Υλικών

Για τις κάθετες καλλιέργειες απαιτείται ένας αριθμός εισροών υλικών ή αναλωσίμων. Ανάλογα με το σύστημα, αυτό μπορεί να περιλαμβάνει όλες τις αναλώσιμες εισροές, όπως συσκευασία για εισροές (π.χ. χαρτόνι, πλαστικά κ.λπ.), μέσα καλλιέργειας, νερό, λιπάσματα, έλεγχο του pH, προστατευτική ενδυμασία, σπόρους, εμπλουτισμό με CO₂, υλικά καθαρισμού, άλλα χημικά και συσκευασία για προϊόντα (συμπεριλαμβανομένων γλαστρών, εξωτερικού περιτυλίγματος, χαρτονιού, πλαστικών). Για ορισμένα υλικά μπορεί να υπάρχουν πιο λεπτομερή δεδομένα. Μπορούν να γίνουν υποθέσεις και να τεκμηριωθούν οι ποσότητες που χρησιμοποιούνται με βάση τις συνολικές εκροές. Πρακτικά, μπορεί επίσης να είναι δυνατόν να επανεξεταστούν τα έξοδα και να γίνουν εκτιμήσεις σχετικά με τις ποσότητες που χρησιμοποιούνται ετησίως.

2. Ενέργεια

Για τις μονάδες VF, η ζήτηση ενέργειας είναι καθοριστικής σημασίας για τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Ως εκ τούτου, είναι ζωτικής σημασίας η συλλογή δεδομένων σχετικά με την ποσότητα της χρησιμοποιούμενης ενέργειας, εκτός από την προέλευσή της. Για την ηλεκτρική ενέργεια, οι πληροφορίες σχετικά με την πηγή είναι σημαντικές για την LCA και θα πρέπει να επανεξεταστούν οι σχετικές πληροφορίες σχετικά με τα πιστοποιητικά προέλευσης της ηλεκτρικής ενέργειας. Η κατανάλωση ενέργειας σχετίζεται κυρίως με τη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας για φωτισμό LED και στη συνέχεια για τις αντλίες, συστήματα θέρμανσης, δροσισμού και αερισμού (HVAC), εξοπλισμό παρακολούθησης και άλλες διεργασίες. Εάν χρησιμοποιούνται εξωτερικές πηγές θέρμανσης από άλλους ενεργειακούς φορείς εκτός της ηλεκτρικής ενέργειας, αυτές θα πρέπει επίσης να συμπεριληφθούν στη μελέτη, π.χ. φυσικό αέριο ή τηλεθέρμανση.

3. Μεταφορά

Για την διεξαγωγή μίας LCA, στην αξιολόγηση συμπεριλαμβάνονται πληροφορίες σχετικά με την απόσταση μεταφοράς όλων των υλικών που εισέρχονται στο αγρόκτημα, καθώς και των προϊόντων και των αποβλήτων που εξέρχονται από το αγρόκτημα. Οι σημαντικές πληροφορίες εδώ περιλαμβάνουν τις αποστάσεις από την προέλευση των υλικών και των προμηθειών. Ενώ μπορούν να συμπεριληφθούν λεπτομερείς πληροφορίες, μπορούν να γίνουν υποθέσεις σχετικά με τις αποστάσεις. Επιπλέον, για τη μεταφορά των προϊόντων στις αγορές, μπορεί να παρέχεται ανάλυση των διαφόρων αγορών ή να παρέχεται μια μέση απόσταση ταξιδιού. Εάν η μεταφορά των αντικειμένων από και προς την εκμετάλλευση γίνεται με άλλες μορφές, μπορούν επίσης να συμπεριληφθούν σύνολα δεδομένων, π.χ. για την οδήγηση αυτοκινήτου ή φορτηγού, τα οποία συνήθως σχετίζονται με τον αριθμό των χιλιομέτρων που διανύθηκαν.

4. Υποδομή

Η υποδομή για τη φάρμα κάθετης καλλιέργειας αποτελεί σημαντικό στοιχείο για την αξιολόγηση του συστήματος. Για ένα VF, αυτό μπορεί να περιλαμβάνει χαλύβδινες κατασκευές, δεξαμενές, σωληνώσεις, αντλίες, ηλεκτρονικά, μηχανήματα (σποράς, συσκευασίας κ.λπ.), εξοπλισμό HVAC, εξοπλισμούς LED κ.λπ. Είναι επίσης σημαντικό να ληφθεί υπόψη η διάρκεια ζωής της υποδομής. Ως εκ τούτου, το σύνολο της υποδομής δεν επηρεάζει τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις της κάθετης φάρμας σε ένα συγκεκριμένο έτος, αλλά κατανέμεται κατά τη διάρκεια της ζωής. Ένα παράδειγμα είναι οι υποτιθέμενες χαλύβδινες κατασκευές που έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής. Καθώς υποτίθεται ότι η δομή περιλαμβάνει 1500 kg

χάλυβα, με διάρκεια ζωής 25 έτη, η επίπτωση στο ετήσιο σύστημα θα σχετίζεται με τη χρήση 60 kg χάλυβα. Η υποδομή μπορεί επίσης να έχει διαφορετική διάρκεια ζωής, δηλ. σχετικούς χρόνους ζωής. Ενώ οι χαλύβδινες κατασκευές μπορεί να έχουν υποθετικά μεγάλη διάρκεια ζωής, τα φωτιστικά LED και ο λοιπός ενεργός εξοπλισμός, όπως οι αντλίες, οι σωληνώσεις και τα διάφορα πλαστικά μπορεί να έχουν πολύ μικρότερη διάρκεια ζωής λόγω της ενεργού χρήσης τους. Η συντήρηση και ο πρόσθετος εξοπλισμός και η υποδομή μπορούν επίσης να συμπεριληφθούν, εάν υπάρχουν διαθέσιμες πληροφορίες. Ο επαγγελματίας της LCA και η εταιρεία VF θα πρέπει να κάνουν υποθέσεις σχετικά με τη διάρκεια ζωής όλων των υποδομών με βάση στοιχεία τόσο από την πρακτική εμπειρία, πληροφορίες από τον παραγωγό, την επιστημονική βιβλιογραφία και να φροντίσουν να τις τεκμηριώσουν στη μελέτη.

5. Εκροές

Ενώ ορισμένοι παραγωγοί ειδικεύονται σε μία μόνο ή σε μια χούφτα εκροών, άλλοι μπορεί να έχουν ένα μεγάλο εύρος διαφορετικών προϊόντων. Αυτά μπορούν να λογιστικοποιηθούν με διαφορετικό τρόπο, ανάλογα με το είδος της παραγωγής (π.χ. σαλάτα, βότανα, μανιτάρια κ.λπ.). Επιπλέον, ενώ ορισμένες εκμεταλλεύσεις μπορεί να πωλούν συγκομισμένες καλλιέργειες, άλλες μπορεί να πωλούν φυτά σε γλάστρες με συσκευασία και καλλιεργητικά μέσα. Ως εκ τούτου, είναι σημαντικό για μια LCA να λαμβάνει υπόψη τον τύπο του προϊόντος που πωλείται. Συνήθως αυτό γίνεται με την καταγραφή του βρώσιμου μέρους, π.χ. σε κιλά, του προϊόντος προς λιανική πώληση. Για τα φυτά σε γλάστρες, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο συνολικός αριθμός ετησίως. Επιπλέον, θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη και τα απόβλητα από την εκμετάλλευση, βλέπε επόμενη ενότητα.

6 Διαχείριση αποβλήτων

Εκτός από το βρώσιμο τμήμα των προϊόντων που πωλούνται στην αγορά, ενδέχεται να υπάρχουν διάφορα ρεύματα αποβλήτων και υπολειμμάτων που παράγονται από την εκμετάλλευση. Αυτά περιλαμβάνουν, μεταξύ άλλων, βιολογικά απόβλητα (π.χ. καλλιεργητικά μέσα και φυτά), απόβλητα συσκευασίας, λύματα προς αποχέτευση, εξοπλισμό και τυχόν άλλα αναλώσιμα (π.χ. προστατευτική ενδυμασία). Για κάθε μία από αυτές τις ροές, θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η ποσότητα και η μέθοδος χειρισμού των αποβλήτων τους. Οι μέθοδοι χειρισμού αποβλήτων για τις διάφορες ροές αποβλήτων μπορεί να διαφέρουν ανάλογα με την τοποθεσία και την IVF. Αυτό μπορεί να περιλαμβάνει την αποστολή των αποβλήτων για αποτέφρωση, υγειονομική ταφή ή ανακύκλωση για ορισμένα υλικά. Εάν στην παραγωγή περιλαμβάνονται υπολειμματικές ροές, π.χ. προϊόντα ή ενέργεια που πωλούνται σε άλλα συστήματα, αυτές είναι σημαντικά δεδομένα για τη διεξαγωγή μίας αντιπροσωπευτικής LCA. Αυτό μπορεί να περιλαμβάνει την υπολειμματική θερμότητα που μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε άλλες εφαρμογές, π.χ. θέρμανση του κτιρίου υποδοχής και άλλων συναφών χώρων (Martin et al., 2022). Σε μελέτες με προοπτική cradle-to-grave, μια σημαντική πτυχή που πρέπει να ληφθεί υπόψη είναι ο χειρισμός των αποβλήτων του τελικού προϊόντος και της συσκευασίας. Ως εκ τούτου, τα υλικά και ο σχεδιασμός της συσκευασίας μπορεί να είναι σημαντικά σε αυτό το στάδιο. Και πάλι, θα πρέπει να ληφθούν υπόψη οι μέθοδοι για την επεξεργασία αυτών των ροών αποβλήτων. Πρακτικά, μετά την έξοδο του προϊόντος από το αγρόκτημα αυτό μπορεί να μην είναι σαφές, καθώς δεν είναι διαθέσιμες πληροφορίες σχετικά με τη συμπεριφορά των καταναλωτών, συμπεριλαμβανομένου του τρόπου με τον οποίο χρησιμοποιούν το προϊόν, το μερίδιο των αποβλήτων και το τι κάνουν με τα απόβλητα. Ως εκ τούτου, μπορούν να γίνουν υποθέσεις με βάση τις τοπικές συνθήκες και τα συστήματα που είναι διαθέσιμα στην περιοχή.

7. Ηλεκτρισμός και έλεγχος του κλίματος

Ομοίως με άλλες μορφές γεωργίας σε ελεγχόμενο περιβάλλον, η ενέργεια είναι εξαιρετικά σημαντική για τις κάθετες φάρμες. Από προηγούμενες έρευνες έχει διαπιστωθεί ότι το μεγαλύτερο μερίδιο των περιβαλλοντικών επιπτώσεων από τις VF προέρχεται από τις ενεργειακές απαιτήσεις για τα συστήματα LED και HVAC (Graamans et al., 2018; Martin et al., 2022 και Weidner et al., 2022). Επιπλέον, δεδομένου του μεγάλου μεριδίου των εκπομπών από πηγές ενέργειας, τα αποτελέσματα είναι ιδιαίτερα ευαίσθητα στην πηγή, για την ηλεκτρική ενέργεια. Συνιστάται κατά τη διενέργεια LCA για VF να χρησιμοποιείται το περιφερειακό ενεργειακό μείγμα ή τα μείγματα.

Ως παράδειγμα, οι Martin et al. (2019, 2022) παρουσιάζουν την ευαισθησία της χρήσης του σουηδικού μείγματος ηλεκτρικής ενέργειας έναντι ενός σκανδιναβικού μείγματος ηλεκτρικής ενέργειας στην περιβαλλοντική επίδοση ενός VF, επιβεβαιώνοντας σημαντικές διαφορές μεταξύ των δύο επιλογών. Επιπλέον, εάν ένα VF αγοράζει ηλεκτρική ενέργεια με πιστοποιητικά προέλευσης, π.χ. από υδροηλεκτρική ή αιολική ενέργεια, αυτό θα πρέπει επίσης να συγκρίνεται με το περιφερειακό σύστημα. Αυτό φαίνεται ενδεικτικά σε μια πρόσφατη μελέτη για VF στη Σουηδία, όπου η επιλογή ηλεκτρικής ενέργειας με βάση την υδροηλεκτρική ενέργεια οδήγησε σε χαμηλότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις σε σύγκριση με άλλες μελέτες από τη Σουηδία, βλέπε π.χ. Milestad et al. (2020). Επιπλέον, τα διάφορα πρότυπα για τη διεξαγωγή LCA χειρίζονται διαφορετικά τη χρήση της προέλευσης της ενέργειας και είναι σκόπιμο να παρουσιάζονται αποτελέσματα με βάση διαφορετικές πηγές και μείγματα ηλεκτρικής ενέργειας, προκειμένου συγκεκριμενοποιείται η κριτική για τη χρήση ενέργειας. Συμπερασματικά, συνιστάται κατά τη διεξαγωγή μιας LCA με σκοπό την παρουσίαση της ευαισθησίας των διαφορετικών μειγμάτων ηλεκτρικής ενέργειας στα αποτελέσματα της μελέτης.

8. Υποστρώματα

Για τις VF, η επιλογή του υποστρώματος μπορεί επίσης να επηρεάσει σημαντικά την περιβαλλοντική απόδοση του συστήματος. Προηγούμενες έρευνες έχουν δείξει ότι υποστρώματα όπως ο περλίτης και η τύρφη μπορεί να έχουν μεγάλες περιβαλλοντικές επιπτώσεις, ενώ χαμηλότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις διαπιστώνονται για υποπροϊόντα όπως ο κοκοφοίνικας (Martin et al., 2019, 2022; Quantis, 2012). Η χρήση της τύρφης εξακολουθεί επίσης να είναι αμφιλεγόμενη (Charman et al., 2003; Salomaa et al., 2018). Ωστόσο, θα πρέπει να διεξαχθούν περαιτέρω έρευνες σχετικά με τις περιβαλλοντικές επιδόσεις των διαφόρων υποστρωμάτων, καθώς εξελίσσεται η χρήση νέων υλικών για εφαρμογές σε VF. Αυτά συνήθως περιλαμβάνουν μείγματα υλικών αυξάνοντας ταυτόχρονα την εισροή νέων υλικών υποστρώματος ειδικά σχεδιασμένων για εφαρμογές σε συστήματα VF. Ανάλογα με το σύστημα καλλιέργειας που υιοθετείται, η ποσότητα του υποστρώματος που απαιτείται από το VF μπορεί επίσης να διαφέρει σημαντικά ή ακόμη και να μην υπάρχει (π.χ. όταν οι αεροπονικές εκμεταλλεύσεις χρησιμοποιούν επαναχρησιμοποιήσιμα στρώματα σποράς, τα οποία λαμβάνονται από ανακυκλωμένα υλικά). Κατά συνέπεια, θα πρέπει επίσης να προβλεφθούν στρατηγικές που να λαμβάνουν υπόψη τη μείωση της χρήσης υποστρώματος, όταν εκπονούνται συγκριτικά σενάρια. Θα πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι οι εγγενείς ιδιότητες των διαφόρων υποστρωμάτων μπορούν επίσης να επηρεάσουν τις μεθόδους διαχείρισης των αποβλήτων τους. Για τα ανόργανα υποστρώματα, η υγειονομική ταφή ή η αποτέφρωση μπορεί να είναι η μόνη επιλογή, ενώ για άλλα βιολογικά υλικά μπορεί να χρησιμοποιηθεί η κομποστοποίηση ή η ανακύκλωση. Αυτό μπορεί επίσης να επηρεάσει τη διαχείριση των αποβλήτων και θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στο σχεδιασμό του συστήματος, π.χ. για την προώθηση πιο κλειστών ή κυκλικών συστημάτων.

9. Συσκευασία

Σε προηγούμενες μελέτες διαπιστώθηκε ότι η συσκευασία συμβάλλει μόνο σε ένα μικρό ποσοστό των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των κάθετων καλλιέργειών. Ωστόσο, ένας μεγάλος αριθμός μελετών έχει επίσης αποκλείσει τη συσκευασία από την αξιολόγησή τους (Graamans et al., 2018; Romeo et al., 2018; Weidner et al., 2022), αιτιολογώντας το μικρό μερίδιό της στις συνολικές επιπτώσεις. Ωστόσο, παρά το σχετικά μικρό μερίδιό της στις συνολικές επιπτώσεις, ετησίως η συνολική κατανάλωση ορισμένων υλικών μπορεί να συμβάλει σε ένα μεγάλο περιβαλλοντικό αποτύπωμα (π.χ. εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και κατανάλωση πόρων). Η μείωση της ποσότητας των υλικών, π.χ. των πλαστικών, και η ανάπτυξη προσεγγίσεων για τη μετάβαση από τα συμβατικά πλαστικά μαύρου χρώματος σε άλλα χρώματα ή σε άλλα υλικά βιολογικής προέλευσης, μπορεί να επιτρέψει τη δυνατότητα ανακύκλωσης και κομποστοποίησης. Αυτό εξαρτάται επίσης από την περιοχή και το πλαίσιο των αγορών για τα προϊόντα VF. Ως εκ τούτου, η συσκευασία θα πρέπει να επιλέγεται προσεκτικά, καθώς μπορεί επίσης να επηρεάσει τις μεθόδους χειρισμού των αποβλήτων της. Χρειάζονται περαιτέρω μελέτες για την κατανόηση αυτού του αντίκτυπου, ιδίως καθώς η βιομηχανία VF έχει σπεύσει να αντιμετωπίσει τη χρήση πλαστικών στο πλαίσιο των εργασιών της για τη βιωσιμότητα.

Πλεονεκτήματα και Προκλήσεις της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής σε κλειστές κάθετες καλλιέργειες

Η δύναμη της LCA έγκειται στην ολοκληρωμένη προσέγγισή της για την αξιολόγηση των ροών με ανοδική ή με καθοδική πορεία ενός προϊόντος ή μιας υπηρεσίας (Hermann et al., 2007). Αυτό είναι σημαντικό, καθώς οι επιπτώσεις ενός προϊόντος ή μιας υπηρεσίας μπορεί να έχουν επιπτώσεις άνισα κατανομημένες κατά μήκος του κύκλου ζωής. Για την αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων ενός προϊόντος ή μιας υπηρεσίας, η LCA δεν μπορεί να αντικατασταθεί πλήρως, καθώς άλλα σκαλοπάτια μπορεί να μην ξεετάζουν την προοπτική cradle-to-gate (Finnveden, 2009). Η αντικειμενικότητα, οι μεθοδολογικές εκτιμήσεις και η πληρότητα συζητούνται εδώ και δεκαετίες (Arvidsson et al., 2018; Freidberg, 2014). Όπως περιγράφηκε προηγουμένως, η κατανομή και άλλες μεθοδολογικές επιλογές έχουν αποτελέσει αντικείμενο εκτεταμένης επιστημονικής συζήτησης στον τομέα (Brandao et al., 2017). Η διαθεσιμότητα δεδομένων μπορεί επίσης να αποτελέσει περιοριστικό παράγοντα για τη διενέργεια LCA σε VFs, με περιορισμένα δεδομένα για συγκεκριμένα υλικά και στοιχεία υποδομής, π.χ. υποστρώματα και συστατικά για την υποδομή. Η LCA περιορίζεται επίσης στις περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Ως εκ τούτου, μπορεί να είναι δύσκολο να καταγραφούν τα οφέλη των VF για την παροχή τοπικών τροφίμων σε σύγκριση με τις συμβατικές μεθόδους. Παρά το γεγονός αυτό, παρόμοιες εκτιμήσεις μπορούν να γίνουν για την εκτίμηση των κοινωνικών και οικονομικών επιπτώσεων χρησιμοποιώντας άλλες προσεγγίσεις του κύκλου ζωής, όπως η κοινωνική ανάλυση κύκλου ζωής και η κοστολόγηση του κύκλου ζωής. Αυτές μπορούν ακόμη και να συνδυαστούν για να παρέχουν μια πιο ολιστική προσέγγιση για την αξιολόγηση της βιωσιμότητας, χρησιμοποιώντας την αξιολόγηση της βιωσιμότητας του κύκλου ζωής (Sala et al., 2013; Zamagni et al., 2013).

Συμπεράσματα και Μελλοντικές Τάσεις στην έρευνα

Η πλειονότητα των σημερινών συστημάτων κάθετης καλλιέργειας χρησιμοποιούν γραμμικές προσεγγίσεις για την παραγωγή τους. Αυτό συνεπάγεται με τη χρήση εισαγόμενων (συχνά παρθένα) υλικών από περιοχές εκτός των άμεσων περιοχών τους για όλες τις απαιτήσεις τους σε πόρους και ενέργεια. Στο μέλλον, η χρησιμοποίηση ανακυκλωμένων υλικών εκτός από ανανεώσιμες και υπολειμματικές πηγές ενέργειας μπορεί να μειώσει τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις των αναλωσίμων και άλλων εισροών. Καθώς οι πόλεις καθίστανται σημαντική κινητήρια δύναμη για την κυκλική οικονομία

και ως κρίσιμος ενδιαφερόμενος για την ανάπτυξη και τη βελτίωση της επισιτιστικής ασφάλειας, οι συνέργειες μεταξύ των IVF και των αστικών υποδομών τους είναι απαραίτητες για την κατανόηση και τον σχεδιασμό των μελλοντικών αστικών συστημάτων τροφίμων.

Ως εκ τούτου, οι βιώσιμες λύσεις για πιο ολοκληρωμένα τρόφιμα, νερό, ενέργεια και μεταφορές θα αποκτούν ολοένα και μεγαλύτερη σημασία. Όπως εξηγούν, ορισμένες εταιρείες διερευνούν τέτοιες εξελίξεις παγκοσμίως, οι οποίες έχουν τη δυνατότητα να αναπτύξουν πιο κυκλικές προσεγγίσεις για τη βιομηχανία των VF και ενδεχομένως να βελτιώσουν τις περιβαλλοντικές επιδόσεις των κάθετων καλλιεργειών. Τα επόμενα χρόνια, αναμένεται ότι η παραγωγή VF θα κερδίσει όσον αφορά τη διαφοροποίηση των προϊόντων, μεταβαίνοντας από τα σημερινά συστήματα, τα οποία βασίζονται κυρίως σε φυλλώδη λαχανικά, βότανα και microgreens και μούρα προς ένα ευρύ φάσμα γεωργικών προϊόντων. Σύμφωνα με τους ερευνητές, στο μέλλον, αυτά αναμένεται να περιλαμβάνουν βρώσιμα λουλούδια, φυτά σε γλάστρες, φυτά με πρωτεϊνική αξία όπως φασόλια, ρεβύθια, αρακά κ.λπ. Για τα προϊόντα αυτά, οι συγκριτικές αξιολογήσεις σε σχέση με τα συμβατικά συστήματα παραγωγής (τόσο από την άποψη της καλλιέργειας όσο και της μεταφοράς/αποθήκευσης), μπορεί να καταστούν πιο σημαντικές για τη σύγκριση των επιπτώσεων των VF.

Βιβλιογραφία

Arvidsson, R., Tillman, A.-M., Sandén, B. A., Janssen, M., Nordelöf, A., Kushnir, D. and Molander, S. (2018). Environmental assessment of emerging technologies: recommendations for prospective LCA. *J. Ind. Ecol.* 22(6), 1286–1294

Brandao, M., Martin, M., Cowie, A., Hamelin, L. and Zamagni, A. (2017). Consequential Life Cycle Assessment: What, How, and Why?. Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences. Elsevier, December 2017.

Chapman, S., Buttler, A., Francez, A.-J., Laggoun-Défarge, F., Vasander, H., Schloter, M., Combe, J., Grosvernier, P., Harms, H., Epron, D., Gilbert, D. and Mitchell, E. (2003). Exploitation of northern peatlands and biodiversity maintenance: a conflict between economy and ecology. *Front. Ecol. Environ.* 1(10), 525–532.

Dorr, E., Koegler, M., Gabrielle, B. and Aubry, C. (2021). Life cycle assessment of a circular, urban mushroom farm. *J. Clean. Prod.* 288, 125668

Finnveden, G., Hauschild, M. Z., Ekvall, T., Guinée, J., Heijungs, R., Hellweg, S., Koehler, A., Pennington, D. and Suh, S. (2009). Recent developments in life cycle assessment. *J. Environ. Manag.* 91, 1–21.

Freidberg, S. (2014). Footprint technopolitics. *Geoforum* 55, 178–189.

Graamans, L., Baeza, E., van den Dobbelsteen, A., Tsafaras, I. and Stanghellini, C. (2018). Plant factories versus greenhouses: comparison of resource use efficiency. *Agric. Syst.* 160, 31–43

Hallikainen, E. (2018). Life Cycle Assessment on Vertical Farming. Master Thesis. Aalto University, School of Engineering. Retrieved from https://aaltodoc.aalto.fi/bitstream/handle/123456789/36351/master_Hallikainen_Eero_2019.pdf?isAllowed=y&sequence=2

ISO (2006). ISO 14044:2006 Environmental Management -Life Cycle Assessment -Requirements and Guidelines. International Standards Organisation (ISO).

Martin, M. and Molin, E. (2019). Environmental assessment of an urban vertical hydroponic farming system in Sweden. *Sustainability* 11(15), 4124.

Martin, M., Weidner, T. and Gullström, C. (2022). Estimating the potential of building integration and regional synergies to improve the environmental performance of urban vertical farming. *Front. Sustain. Food Syst.* 6, 849304.

Martin, M. and Orsini, F. (2023). Life Cycle Assessment of indoor vertical farms. *Burleigh Dodds Series in Agricultural Science*. <http://dx.doi.org/10.19103/AS.2023.0126.06>

Milestad, R., Carlsson-Kanyama, A. and Schaffer, C. (2020). The Högdalen urban farm: a real case assessment of sustainability attributes. *Food Secur.* 12(6), 1461–1475

Quantis (2012). Comparative Life Cycle Assessment of Horticultural Growing Media Based on Peat and Other Growing Media Constituents Final Report. Quantis, Lausanne

Romeo, D., Veà, E. B. and Thomsen, M. (2018). Environmental impacts of urban hydroponics in Europe: a case study in Lyon. *Procedia CIRP* 69, 540–545

Sala, S., Farioli, F. and Zamagni, A. (2013). Progress in sustainability science: lessons learnt from current methodologies for sustainability assessment: Part 1. *Int. J. Life Cycle Assess.* 18(9), 1653–1672.

Salomaa, A., Paloniemi, R. and Ekroos, A. (2018). The case of conflicting Finnish peatland management – skewed representation of nature, participation and policy instruments. *J. Environ. Manage.* 223, 694–702

Weidner, T., Yang, A. and Hamm, M. W. (2021). Energy optimisation of plant factories and greenhouses for different climatic conditions. *Energy Convers. Manage.* 243, 114336.

Weidner, T., Yang, A., Forster, F. and Hamm, M. W. (2022). Regional conditions shape the food–energy–land nexus of low-carbon indoor farming. *Nat. Food* 3(3), 206–216.

Sala, S., Farioli, F. and Zamagni, A. (2013). Progress in sustainability science: lessons learnt from current methodologies for sustainability assessment: Part 1. *Int. J. Life Cycle Assess.* 18(9), 1653–1672.