



ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΑΝΟΙΚΤΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΕΞΕΙΔΙΚΕΥΣΗΣ
ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ (ΔΙΑ)

ΤΙΤΛΟΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

**Αξιοποίηση αστικών υγρών αποβλήτων και αστικών στερεών βιοαποβλήτων
για άρδευση και λίπανση καλλιεργειών.**

ΔΡΟΛΙΑ ΕΙΡΗΝΗ

ΑΜ: 142382

1^{ος} ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ
ΚΟΜΝΙΤΣΑΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ
2^{ος} ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ
ΠΑΠΑΪΩΑΝΝΟΥ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ

Σεπτέμβριος 2023

Δρόλια Ειρήνη: 'Αξιοποίηση αστικών υγρών αποβλήτων και αστικών στερεών βιοαποβλήτων για άρδευση και λίπανση καλλιεργειών'

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία της φοιτήτριας Δρόλια Ειρήνη που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης η δημιουργός εκχωρεί στο ΕΑΠ, μη αποκλειστική άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, προσαρμογής, δημόσιου δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσής τους διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος και για όλο το χρόνο διάρκειας των δικαιωμάτων πνευματικής ιδιοκτησίας. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο για μελέτη και ανάγνωση δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του/της συγγραφέα/δημιουργού ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, αποθήκευση, πώληση, εμπορική χρήση, μετάδοση, διανομή, έκδοση, εκτέλεση, «μεταφόρτωση» (downloading), «ανάρτηση» (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του/της συγγραφέα/δημιουργού. Η δημιουργός διατηρεί το σύνολο των ηθικών και περιουσιακών του δικαιωμάτων.

Διπλωματική Εργασία

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	3
ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ	3
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	5
2. ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΥΓΡΩΝ ΑΣΤΙΚΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ ΓΙΑ ΑΡΔΕΥΣΗ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΩΝ.....	11
2.1 Τεχνολογίες επεξεργασίας.....	16
2.2 Εφαρμοσμένες τεχνολογίες σε καλλιέργειες.....	18
3. ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΥΓΡΩΝ ΑΣΤΙΚΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ ΓΙΑ ΛΙΠΑΝΣΗ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΩΝ.....	26
3.1 Αξιοποίησης ιλύος.....	26
3.2 Ανάκτηση φωσφόρου και αζώτου από υγρά αστικά απόβλητα.	33
4. ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΣΤΕΡΕΩΝ ΑΣΤΙΚΩΝ ΒΙΟΑΠΟΒΛΗΤΩΝ.	38
4.1 Αξιοποίηση βιοαποβλήτων ως εδαφοβελτιωτικό – compost.....	39
4.2 Αξιοποίηση βιοαποβλήτων ως Biochar.....	42
5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ –ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ.....	48
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	51

Δρόγια Ειρήνη: 'Αξιοποίηση αστικών υγρών αποβλήτων και αστικών στερεών βιοαποβλήτων για άρδευση και λίπανση καλλιεργειών'

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Παγκοσμίως η στρατηγική διαχείρισης των αποβλήτων εστιάζει στην ελαχιστοποίηση της παραγωγής, την επαναχρησιμοποίηση, την ανακύκλωση και την αξιοποίησή τους. Η ορθή διαχείριση των αποβλήτων μπορεί να δώσει λύσεις στην ανάγκη για εξοικονόμηση υδάτινων πόρων, φυσικών πρώτων υλών ή να συνεισφέρει στην παραγωγή ενέργειας.

Ειδικά, στον τομέα της γεωργίας η αξιοποίηση αστικών υγρών αποβλήτων και αστικών στερεών βιοαποβλήτων μπορεί να βοηθήσει αποτελεσματικά στην άρδευση και λίπανση καλλιεργειών. Η επαναχρησιμοποίηση των αστικών υγρών αποβλήτων μπορεί να συμβάλλει καθοριστικά στις αυξανόμενες απαιτήσεις νερού. Παράλληλα, η εφαρμογή της παραγόμενης ιλύος, από τις διαδικασίες επεξεργασίας των υγρών αποβλήτων, στο έδαφος είναι μια βιώσιμη πρακτική, για την αύξηση της γονιμότητάς του. Ακόμα, προς την ενίσχυση και υποστήριξη της γεωργίας τα παραγόμενα αστικά βιοαπόβλητα, με κατάλληλη επεξεργασία, μπορούν να αποδώσουν υψηλής ποιότητας εδαφοβελτιωτικά, που θα αυξήσουν τα ποιοτικά και ποσοτικά χαρακτηριστικά των καλλιεργειών.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

Αστικά υγρά απόβλητα, αστικά στερεά βιοαπόβλητα, ενεργός ιλύς, κομποστ, βιοεξανθρακώματα.

Διπλωματική Εργασία

Δρόλια Ειρήνη: 'Αξιοποίηση αστικών υγρών αποβλήτων και αστικών στερεών βιοαποβλήτων για άρδευση και λίπανση καλλιεργειών'

SUMMARY / ABSTRACT

The waste management strategy, globally, focuses on minimizing production, reusing, and recycling of waste. The right waste management can give solutions, in order to protect water resources, natural raw materials or contribute to energy production.

Especially, in the field of agriculture the utilization of civil wastewater and civil solid biowaste can effectively help in the irrigation and fertilization of numerous crops. The reuse of municipal wastewater can contribute to continually increasing water demands. At the same time, the application of the sewage sludge, from the wastewater treatment processes, to the soil is a sustainable practice, to increase its fertility. Also, the civil solid biowaste, with appropriate processing, can produce high-quality biostimulants, which will increase the growth, yield, and quality of the crops.

KEYWORDS

Municipal wastewater, civil solid biowaste, sewage sludge, compost, biochar

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ουσιαστικό στοιχείο του νέου ευρωπαϊκού και παγκόσμιου οικονομικού μοντέλου, αποτελεί η κυκλική οικονομία. Πρόκειται για ένα 'πράσινο' μοντέλο ανάπτυξης, που κύριος στόχος του είναι η παραγωγή προϊόντων και υπηρεσιών με λιγότερους και πιο 'πράσινους' πόρους. Γενικά, η κυκλική οικονομία ενθαρρύνει πρότυπα παραγωγής και κατανάλωσης που συνεισφέρουν στην επίτευξη της μείωσης εκπομπής αερίων του θερμοκηπίου και στην προστασία του περιβάλλοντος. Ακρογωνιαίοι λίθοι της είναι η ελαχιστοποίηση των αποβλήτων, η αύξηση της ανακύκλωσης, η βέλτιστη αξιοποίηση των φυσικών πόρων, η επέκταση ζωής των προϊόντων καθώς και η αξιοποίηση δευτερογενών υλικών και αποβλήτων, ως παραγωγικών πόρων και χρήσιμων υλικών, στο πλαίσιο ενός βιώσιμου παραγωγικού μοντέλου. Από την αποτελεσματική εφαρμογή της κυκλικής οικονομίας στην ευρωπαϊκή ένωση αναμένονται οφέλη, όπως μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, ανάπτυξη της τάξεως του 6% με παράλληλη εξοικονόμηση πόρων, δημιουργία νέων θέσεων εργασίας - πάνω από 2 εκατομμύρια, μείωση κόστους λειτουργίας επιχειρήσεων (www.ypen.gr).

Απαραίτητη προϋπόθεση για την επιτυχή εφαρμογή της κυκλικής οικονομίας είναι η ορθή διαχείριση των αποβλήτων. Οδηγίες και κανονισμοί ανά την υφήλιο οριοθετούν το καθεστώς διαχείρισης των αποβλήτων σε κάθε χώρα. Γενικά, η στρατηγική διαχείρισης των αποβλήτων παγκοσμίως περιστρέφεται γύρω από την ελαχιστοποίηση της παραγωγής, την επαναχρησιμοποίηση, την ανακύκλωση και την αξιοποίηση. Η αυθαίρετη διάθεση αποβλήτων ενδέχεται να αποτελέσει σημαντική απειλή για την δημόσια υγεία ή το περιβάλλον. Αντίθετα, ένα αποτελεσματικό σύστημα διαχείρισης αποβλήτων, με τρόπο οικονομικά βιώσιμο και φιλικό προς το περιβάλλον, μπορεί να συνεισφέρει στην μείωση της εξάντλησης των φυσικών πόρων, μέσω παραγωγής ενέργειας, παραγωγής δευτερογενούς πρώτης ύλης ή ανάκτησης πρώτων υλών.

Διπλωματική Εργασία

Δρόλια Ειρήνη: 'Αξιοποίηση αστικών υγρών αποβλήτων και αστικών στερεών βιοαποβλήτων για άρδευση και λίπανση καλλιεργειών'

Στην Ελλάδα υπάρχει ένα πλούσιο νομοθετικό πλαίσιο για την διαχείριση των στερεών αποβλήτων (αστικών, βιομηχανικών, γεωργοκτηνοτροφικών). Ο πιο επικαιροποιημένος νόμος είναι ο 4042/2012, ο οποίος ορίζει ως βασική προτεραιότητα την ολοκληρωμένη διαχείριση των αποβλήτων με κύριους άξονες την αύξηση της ανακύκλωσης, τη μείωση παραγωγής αποβλήτων, την παραγωγή προϊόντων κατάλληλων για επαναχρησιμοποίηση, την ανάκτηση ενέργειας από απόβλητα, την ασφαλή τελική διάθεση των αποβλήτων, που δεν μπορούν να αξιοποιηθούν. Επιπρόσθετα, ο ίδιος νόμος θέτει, για τα βιομηχανικά στερεά απόβλητα (επικίνδυνα και μη επικίνδυνα), ως υπεύθυνο διαχείρισης τον παραγωγό – κάτοχο και επιβάλλει την πλήρη εφαρμογή της αρχής 'ο ρυπαίνων πληρώνει', κάτι που επιτυγχάνεται με την έγκριση των περιβαλλοντικών όρων λειτουργίας.

Το ενδιαφέρον μας στη συγκεκριμένη εργασία θα επικεντρωθεί στα αστικά στερεά και υγρά απόβλητα. Πρακτικά, η διαχείριση των αστικών στερεών αποβλήτων (ΑΣΑ) περιλαμβάνει την συλλογή, αποθήκευση, μεταφορά, επεξεργασία και διάθεσή τους, με πρωτεύοντα γνώμονα πάντα την προστασία της δημόσιας υγείας και του περιβάλλοντος. Η συλλογή γίνεται ανά ρεύματα υπό την αιγίδα των Δήμων. Τα ρεύματα περιλαμβάνουν συνήθως μπλε κάδους για ανακυκλώσιμα υλικά, πράσινους κάδους για σύμμεικτα απόβλητα, καφέ κάδους για βιοαπόβλητα, κόκκινους κάδους ενδυμάτων –υποδημάτων, σε κάποιους δήμους υπάρχουν κάδοι για λίπη- έλαια και κάποιοι δήμοι διαθέτουν πράσινα σημεία για συγκέντρωση μπαταριών, ηλεκτρονικού υλικού, λαμπτήρων κτλ.

Αξίζει να επισημανθεί ότι στα στερεά αστικά απόβλητα, τα βιοαπόβλητα αποτελούν μια βασική ροή αποβλήτων, με ποσοστό 34% επί του συνόλου των ΑΣΑ , που για την ΕΕ-28 το 2017 αντιστοιχούσε σε 86 εκατομμύρια τόνους. Η ανακύκλωσή τους θα μπορούσε να αποτελέσει το κλειδί για την επίτευξη του στόχου της ΕΕ για ανακύκλωση του 65% των ΑΣΑ έως το 2035. Ο μεγάλος όγκος των βιοαποβλήτων, αν δεν υποστεί σωστή διαχείριση, εγκυμονεί σημαντικές περιβαλλοντικές και οικονομικές απειλές. Χαρακτηριστικά, τα βιοαποικοδομήσιμα απόβλητα έχει

Διπλωματική Εργασία

Δρόλια Ειρήνη: 'Αξιοποίηση αστικών υγρών αποβλήτων και αστικών στερεών βιοαποβλήτων για άρδευση και λίπανση καλλιεργειών'

εκτιμηθεί ότι αποτελούν σημαντική πηγή εκπομπής αερίων του θερμοκηπίου σε χώρους υγειονομικής ταφής αποβλήτων, που αντιστοιχεί σε περίπου 3% των συνολικών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου της ΕΕ. Η μεγάλη ροή των βιοαποβλήτων οφείλεται κυρίως σε απόβλητα τροφίμων (60%), κάτι που αντανακλά την σπατάλη τροφίμων που υπάρχει και την κατάχρηση οικονομικών πόρων. Μέσα στους στόχους της ΕΕ για βιώσιμη ανάπτυξη είναι να μειωθεί κατά το ήμισυ η σπατάλη τροφίμων έως το 2030. (European Environment Agency, 2020).

Η αξιοποίηση των βιοαποβλήτων θα μπορούσε να συμβάλλει σε μια πιο κυκλική οικονομία, αποδίδοντας εδαφοβελτιωτικό υλικό, βιοαέριο, στερεό υλικό καύσης (pellet) ή και προϊόντα υψηλής αξίας όπως βιοκαύσιμα. Προκείμενου, βέβαια, να είναι εφικτή η αξιοποίηση των βιοαποβλήτων είναι επιτακτική η ορθή διαχείριση, με χωριστή συλλογή. Μάλιστα, η χωριστή συλλογή στην πηγή θα βοηθούσε ώστε να διατηρούνται σε χαμηλά επίπεδα οι προσμίξεις. Ωστόσο, ακόμα και σε χώρες με ξεχωριστό σύστημα συλλογής, υψηλό ποσοστό βιοαποβλήτων εξακολουθεί να καταλήγει στα σύμμεικτα απόβλητα, που αποτίθενται σε ΧΥΤΑ ή αποτεφρώνονται. Το 2018 αναθεωρημένη οδηγία εισήγαγε αρκετές ουσιαστικές αλλαγές, που σχετίζονται με τα βιοαπόβλητα όπως η υποχρεωτική χωριστή συλλογή ή η εξασφάλιση ανακύκλωσης στην πηγή από το τέλος του 2023 και έπειτα (European Environment Agency, 2020). Επιπρόσθετα, πρότυπα ποιότητας καθώς και διαδικασίες διασφάλισης ποιότητας για χωνεμένο υλικό (compost), εδαφοβελτιωτικό, συνεισφέρουν στην απόκτηση εμπιστοσύνης σε αυτά τα προϊόντα και αποτελούν αναπόσπαστο κομμάτι για την οικοδόμηση ενός αποτελεσματικού συστήματος διαχείρισης των βιοαποβλήτων.

Στον ελλαδικό χώρο, δυστυχώς, η αξιοποίηση των βιοαποβλήτων δεν είναι διαδεδομένη και η χωριστή συλλογή βιοαποβλήτων (καφέ κάδοι) βρίσκεται στα σπάργα. Σύμφωνα με στοιχεία από τη βάση δεδομένων WASTE ATLAS του δικτύου των φορέων διαχείρισης στερεών αποβλήτων (ΦΟΔΣΑ) υπάρχουν αρκετές μονάδες (68) υπό έγκριση και σε στάδιο μελλοντικής λειτουργίας αλλά μόνο μια σε

Διπλωματική Εργασία

Δρόλια Ειρήνη: 'Αξιοποίηση αστικών υγρών αποβλήτων και αστικών στερεών βιοαποβλήτων για άρδευση και λίπανση καλλιεργειών'

λειτουργία. Πρόκειται για μια μονάδα στην περιφερειακή ενότητα Ηρακλείου, έκτασης 60 στρεμμάτων, δυναμικότητας 9000t/έτος που διαθέτει κλειστό σύστημα αερόβιας επεξεργασίας κομποστοποίησης.

Όσον αφορά τα αστικά λύματα (οικιακά, βιομηχανικά, γεωργοκτηνοτροφικά, όμβρια ύδατα) η Οδηγία 91/271/ΕΟΚ ενσωματώθηκε στην ελληνική νομοθεσία με το ΦΕΚ Β192/1997, που καθορίζει το πλαίσιο διαχείρισης των αστικών λυμάτων, υποχρεώνοντας τους οικισμούς με ισοδύναμο πληθυσμό πάνω από 2000 στην δημιουργία αποχετευτικού δικτύου και ορίζει τις παραμέτρους διάθεσης των λυμάτων από σταθμούς επεξεργασίας. Το συγκεκριμένο ΦΕΚ, επιδέχθηκε αργότερα κάποιες τροποποιήσεις ακολουθούμενο από τα ΦΕΚ 1811/Β/29.9.1999, ΦΕΚ 405/Β/3.4.2002, καθώς και διευκρινιστικές εγκυκλίους (33942/17/21.2.2018), προκειμένου να εναρμονιστούν καλύτερα στον ελλαδικό χώρο, τα μέτρα και οι όροι για την ορθή διαχείριση και επεξεργασία των αστικών λυμάτων, να παρατεθεί κατάλογος συγκεκριμένων ευαίσθητων περιοχών ή να διευκρινιστεί η διαχείριση αποβλήτων από Υγειονομικές Μονάδες. Η νομοθεσία λοιπόν είναι εκείνη που προσδιορίζει τα μέτρα και τις προϋποθέσεις για την διοχέτευση βιομηχανικών λυμάτων σε αποχετευτικά δίκτυα και σταθμούς επεξεργασίας λυμάτων.

Αποστολή των μονάδων επεξεργασίας λυμάτων (WWTP) είναι η διαχείριση των υγρών αποβλήτων ώστε να μπορούν να διατεθούν με ασφάλεια σε φυσικούς αποδέκτες ή να επαναχρησιμοποιηθούν. Λαμβάνουν χώρα διάφορα στάδια επεξεργασίας όπως προεπεξεργασία, πρωτοβάθμια, δευτεροβάθμια επεξεργασία και σε κάποιες περιπτώσεις και τριτοβάθμια. Κάθε στάδιο επεξεργασίας περιλαμβάνει και μια σειρά μεθόδων. Τελικά προϊόντα της διαχείρισης είναι η ενεργός ιλύς και το επεξεργασμένο νερό. Στη συνέχεια υπάρχει η δυνατότητα διάθεσης της ιλύος σε καλλιεργούμενη γη ή ΧΥΤΑ και του επεξεργασμένου νερού σε φυσικούς αποδέκτες, επαναχρησιμοποίησή του σε κάποια βιομηχανική μονάδα ή εφαρμογή του για άρδευση καλλιεργειών. Παρακάτω, δίνεται στον Πίνακα 1, σύμφωνα με στοιχεία του Υπουργείου Περιβάλλοντος και Ενέργειας (Εγκαταστάσεις Επεξεργασίας Λυμάτων

Διπλωματική Εργασία

Δρόλια Ειρήνη: 'Αξιοποίηση αστικών υγρών αποβλήτων και αστικών στερεών βιοαποβλήτων για άρδευση και λίπανση καλλιεργειών'

Βάση Δεδομένων Παρακολούθησης Λειτουργίας), ποιές μονάδες WWTP στον ελλαδικό χώρο σε συμμόρφωση με την Οδηγία 91/271/ΕΟΚ, προχωρούν σε διαχείριση της παραγόμενης ιλύος και επαναχρησιμοποίηση των επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων.

Υπό το πρίσμα της κυκλικής οικονομίας, στις αυξανόμενες απαιτήσεις για νερό, στην ανάγκη για εξοικονόμηση υδάτινων πόρων και φυσικών πρώτων υλών, η ορθή και ολοκληρωμένη διαχείριση των αποβλήτων θα μπορούσε να είναι μια λύση. Σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι η παράθεση των δυνατοτήτων αξιοποίησης των αστικών υγρών αποβλήτων και αστικών βιοαποβλήτων για άρδευση και λίπανση καλλιεργειών, καθώς και η ανάπτυξη των πιο σύγχρονων, αποτελεσματικών και βιώσιμων μεθόδων για την επίτευξη της αξιοποίησης. Η καινούργια βιβλιογραφική απόθεση της εργασίας είναι η ανασκόπηση στην πρόσφατη επιστημονική έρευνα για την αξιοποίηση των αποβλήτων στον γεωργικό τομέα και η προσπάθεια προσέγγισης του περιβαλλοντικού και οικονομικού οφέλους από την εφαρμογή αυτών των πρακτικών στον ελλαδικό χώρο.

Δρόμια Ειρήνη: 'Αξιοποίηση αστικών υγρών αποβλήτων και αστικών στερεών βιοαποβλήτων για άρδευση και λίπανση καλλιιεργειών'

Πίνακας 1: Αξιοποίηση αστικών υγρών αποβλήτων από WWTP στην Ελλάδα
(<http://astikalimata.ypeka.gr>)

ΜΟΝΑΔΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΛΥΜΑΤΩΝ	ΦΟΡΕΑΣ	ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ	ΕΠΑΝΑΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΣΗ ΛΥΜΑΤΩΝ	ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΙΛΥΟΣ
ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΥΠΟΛΗ	Δ.Ε.Υ.Α. - ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΥΠΟΛΗΣ	Δευτεροβάθμια	Άλλη μέθοδος	Άλλη μέθοδος
ΑΡΧΑΝΕΣ	Δήμος - ΑΡΧΑΝΩΝ-ΑΣΤΕΡΟΥΣΙΩΝ	Απομάκρυνση Φωσφόρου	Άρδευση	ΧΥΤΑ
ΧΑΛΚΙΔΑ	Δ.Ε.Υ.Α. - ΧΑΛΚΙΔΑΣ	Απομάκρυνση Φωσφόρου	Άρδευση	Άλλη μέθοδος
ΧΕΡΣΟΝΗΣΟΣ	Δ.Ε.Υ.Α. - ΧΕΡΣΟΝΗΣΟΥ -ΚΡΗΤΗ	Απομάκρυνση Φωσφόρου	Άρδευση	ΧΥΤΑ
ΧΡΥΣΟΥΠΟΛΗ	Δ.Ε.Υ.Α. - ΝΕΣΤΟΥ	Απομακρυνση Αζώτου	-	Άλλη μέθοδος- Αποστραγγιστική τάφρος
ΕΥΡΩΠΟΣ	Δήμος - Παιονίας	Απομάκρυνση Φωσφόρου	Άρδευση	Άλλη μέθοδος (Ρέμα)
ΦΑΡΣΑΛΑ	Δ.Ε.Υ.Α. - ΦΑΡΣΑΛΩΝ	Απομακρυνση Αζώτου	Άρδευση	ΧΥΤΑ
ΦΟΥΡΚΑ	Δήμος - ΚΑΣΣΑΝΔΡΑΣ	Απομάκρυνση Φωσφόρου	Άρδευση	ΧΥΤΑ
ΚΙΑΤΟ	Δ.Ε.Υ.Α. - ΣΙΚΥΩΝΙΩΝ	Απομακρυνση Αζώτου	Άρδευση	Άλλη μέθοδος
ΚΙΛΚΙΣ	Δ.Ε.Υ.Α. - ΔΗΜΟΤΙΚΗ ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΗ ΥΔΡΕΥΣΗΣ ΑΠΟΧΕΤΕΥΣΗΣ ΚΙΛΚΙΣ	Απομάκρυνση Φωσφόρου	Βιομηχανία	ΧΥΤΑ
ΚΟΛΙΝΔΡΟΣ	Δήμος - ΠΥΔΝΑΣ-ΚΟΛΙΝΔΡΟΥ	Δευτεροβάθμια	Άρδευση	Γεωργία-Έδαφος
ΚΩΣ	Δ.Ε.Υ.Α. - ΔΗΜΟΤΙΚΗ ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΗ ΥΔΡΕΥΣΗΣ ΑΠΟΧΕΤΕΥΣΗΣ ΚΩ	Απομάκρυνση Φωσφόρου	Άρδευση	ΧΥΤΑ
ΚΥΜΗ	Δ.Ε.Υ.Α. - ΚΥΜΗΣ ΑΛΙΒΕΡΙΟΥ	Απομακρυνση Αζώτου	Άλλη μέθοδος	ΧΥΤΑ
ΜΑΛΙΑ	Δ.Ε.Υ.Α. - ΧΕΡΣΟΝΗΣΟΥ	Απομάκρυνση Φωσφόρου	Άρδευση	ΧΥΤΑ
ΜΕΤΑΜΟΡΦΩΣΗ	Δ.Ε.Υ.Α. - ΕΥΔΑΠ Α.Ε.	Δευτεροβάθμια	Άλλη μέθοδος	Άλλη μέθοδος
ΟΡΕΣΤΙΑΔΑ	Δ.Ε.Υ.Α. - ΔΕΥΑ ΟΡΕΣΤΙΑΔΑΣ	Απομάκρυνση Φωσφόρου	Άρδευση	Άλλη μέθοδος- Αποστραγγιστική τάφρος
ΣΗΤΕΙΑ ΚΡΗΤΗΣ	Δ.Ε.Υ.Α. - ΣΗΤΕΙΑΣ	Απομάκρυνση Φωσφόρου	Άρδευση	Γεωργία -ΧΥΤΑ
ΣΚΥΔΡΑ	Δ.Ε.Υ.Α. - ΔΗΜΟΤΙΚΗ ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΗ ΥΔΡΕΥΣΗΣ ΑΠΟΧΕΤΕΥΣΗΣ ΣΚΥΔΡΑΣ	Απομακρυνση Αζώτου		ΧΥΤΑ
ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ	ΕΤΑΙΡΕΙΑ ΥΔΡΕΥΣΗΣ ΑΠΟΧΕΤΕΥΣΗΣ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ	Απομάκρυνση Φωσφόρου	Άλλη μέθοδος	Άλλη μέθοδος
ΤΥΡΝΑΒΟΣ	Δ.Ε.Υ.Α. - ΤΥΡΝΑΒΟΥ	Απομακρυνση Αζώτου	Άρδευση	ΧΥΤΑ
ΖΑΚΥΝΘΟΣ	Δ.Ε.Υ.Α. - Ζακύνθου	Απομάκρυνση Φωσφόρου	Άλλη μέθοδος	ΧΥΤΑ

Διπλωματική Εργασία

Δρόλια Ειρήνη: 'Αξιοποίηση αστικών υγρών αποβλήτων και αστικών στερεών βιοαποβλήτων για άρδευση και λίπανση καλλιέργειών'

2. ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΥΓΡΩΝ ΑΣΤΙΚΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ ΓΙΑ ΑΡΔΕΥΣΗ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΩΝ

Πολλές χώρες, σε παγκόσμια κλίμακα, αντιμετωπίζουν σημαντικό πρόβλημα έλλειψης νερού. Έως το 2050 αναμένεται να επηρεαστεί από έλλειψη νερού το 40% του παγκόσμιου πληθυσμού (Bakarí et al, 2022). Επομένως, η αντιμετώπιση της λειψυδρίας και η εξοικονόμηση νερού είναι επιβεβλημένη. Ο τομέας της γεωργίας, ειδικά, εκτιμάται ότι είναι ο κύριος καταναλωτής νερού με ποσοστό 70% της συνολικής παγκόσμιας χρήσης (Hoekstra et al, 2009). Αδιαμφισβήτητα, τα επεξεργασμένα υγρά απόβλητα θα μπορούσαν να είναι μια σημαντική πηγή νερού άρδευσης αλλά και πηγή θρεπτικών συστατικών για τις καλλιέργειες. Η επαναχρησιμοποίηση των υγρών αποβλήτων μπορεί να συμβάλλει καθοριστικά στις αυξανόμενες απαιτήσεις νερού, στην διαφύλαξη των φυσικών υδάτινων πόρων καθώς και στη μείωση της περιβαλλοντικής ρύπανσης, με τον περιορισμό της απόρριψης λυμάτων σε επιφανειακά ύδατα. Η εφαρμογή μιας τέτοιας πρακτικής είναι ένα βήμα προς την εφαρμογή της κυκλικής οικονομίας και της βιώσιμης φυτικής παραγωγής.

Η άρδευση με επεξεργασμένα υγρά απόβλητα εφαρμόζεται ήδη σε πολλές χώρες όπως Γαλλία, Ιταλία, Ισπανία, Κύπρος, Μάλτα, Ισραήλ, Ιορδανία, ΗΠΑ. Χαρακτηριστικά στην Αυστραλία πολλές χώρες ανακυκλώνουν το 100% των υγρών αποβλήτων. Ωστόσο, σε χώρες με ήπιο κλίμα όπως η Πολωνία και η Γερμανία δεν έχει εφαρμοστεί ακόμα (Chojnacka et al, 2020). Αξίζει να επισημανθεί ότι, η επαναχρησιμοποίηση των υγρών αποβλήτων εμπεριέχει, επιπρόσθετα, το όφελος εμπλουτισμού του εδάφους με θρεπτικά συστατικά (N,P,K) και οργανική ουσία, συμβάλλοντας στην βελτίωση της απόδοσης των καλλιέργειών και στη μείωση του κόστους λίπανσης. Η παρουσία θρεπτικών συστατικών στα επεξεργασμένα λύματα εξαρτάται από τις μεθόδους που χρησιμοποιούνται για την επεξεργασία αλλά και από την περιοχή προέλευσης των λυμάτων. Δεδομένου, λοιπόν, ότι οι συγκεντρώσεις

Διπλωματική Εργασία

Δρόλια Ειρήνη: 'Αξιοποίηση αστικών υγρών αποβλήτων και αστικών στερεών βιοαποβλήτων για άρδευση και λίπανση καλλιέργειών'

θρεπτικών μεταβάλλονται, είναι απαραίτητη η μόνιμη παρακολούθησή τους, ώστε να προσδιορίζεται η συγκέντρωση των θρεπτικών που λαμβάνουν τα φυτά και να εκτιμάται αν απαιτείται επιπρόσθετη χορήγηση λίπανσης για την ικανοποίηση των αναγκών της καλλιέργειας (Chajnačka et al, 2020).

Παρά τις δυνατότητες που προσφέρει η πρακτική της επαναχρησιμοποίησης των υγρών αποβλήτων, δεν είναι ευρέως διαδεδομένη, διότι υπάρχουν επιφυλάξεις και προβληματισμοί ως προς την ασφάλεια των επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων, λόγω της ύπαρξης ρυπαντών που παραμένουν ακόμη και μετά την εφαρμογή θεραπειών (πχ υψηλές συγκεντρώσεις αλάτων, παθογόνα μικρόβια, βαρέα μέταλλα, μικροπλαστικά κ.α). Οι ρυπαντές αυτοί μπορεί να επηρεάσουν την υγεία των φυτών, την ανάπτυξή τους ή την παραγωγικότητά τους. Επιπλέον, υπάρχουν ανησυχίες για πιθανές αλλοιώσεις σε φυσικοχημικές ιδιότητες του εδάφους μετά την εφαρμογή, διάφοροι οργανικοί ή χημικοί ρύποι υπάρχει πιθανότητα να συσσωρευθούν σε αυτό, να προσροφηθούν από τα φυτά, εν συνεχεία να καταναλωθούν από ζώα και μέσω της τροφικής αλυσίδας να επηρεάσουν τη δημόσια υγεία. Γενικά, οι αρνητικές επιπτώσεις της άρδευσης με επεξεργασμένα υγρά απόβλητα επηρεάζονται από τον τύπο του εδάφους, τις μεθόδους άρδευσης και τις επικρατούσες κλιματικές συνθήκες. Υψηλές βροχοπτώσεις για παράδειγμα θα μπορούσαν να επιτρέψουν την έκπλυση αλάτων ή βαρέων μετάλλων. Για την αποφυγή, λοιπόν, πιθανών κινδύνων για την ανθρώπινη υγεία, έχουν περιγραφεί και τεθεί από οργανισμούς ορισμένα κριτήρια, οδηγίες και πρότυπα, για την αξιοποίηση των υγρών αποβλήτων για άρδευση. Τα ποιοτικά χαρακτηριστικά των αποβλήτων στις μονάδες επεξεργασίας υγρών αποβλήτων, είναι εκείνα που θα καθορίσουν τις απαιτούμενες μεθόδους, αποτελεσματικές και οικονομικά βιώσιμες, ώστε να είναι δυνατή η επαναχρησιμοποίηση των υγρών αποβλήτων για άρδευση.

Οι προϋποθέσεις και τα ποιοτικά χαρακτηριστικά των επεξεργασμένων αστικών υγρών αποβλήτων, ορίζονται για την Ελλάδα με την ΚΥΑ 145116/2011, ΦΕΚ Β354 και τον κανονισμό 2020/741 της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Σκοπός της ΚΥΑ είναι η

Διπλωματική Εργασία

Δρόλια Ειρήνη: 'Αξιοποίηση αστικών υγρών αποβλήτων και αστικών στερεών βιοαποβλήτων για άρδευση και λίπανση καλλιεργειών'

προώθηση της επαναχρησιμοποίησης των επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων, η εξοικονόμηση υδατικών πόρων, η αντιμετώπιση των συνεχώς αυξανόμενων φαινομένων λειψυδρίας και ξηρασίας, η μείωση της υφαλμύρισης των υδροφόρων οριζόντων σε ορισμένες περιοχές της χώρας, καθώς και η βελτίωση του υδάτινου ισοζυγίου με την τροφοδότηση των υδροφόρων οριζόντων. Απαραίτητη βέβαια προϋπόθεση πάντα πρέπει να είναι η Διασφάλιση της Δημόσιας Υγείας.

Σύμφωνα με την νομολογία, τα επεξεργασμένα υγρά απόβλητα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για άρδευση καλλιεργειών (καλλιέργειες που προορίζονται για ανθρώπινη κατανάλωση – ακατέργαστες ή μετά από μια διαδικασία επεξεργασίας ή καλλιέργειες που δεν προορίζονται για ανθρώπινη κατανάλωση-βοσκοτόπια, ζωοτροφές, σποροπαραγωγή), για βιομηχανική χρήση ή για περιβαλλοντικούς και αστικούς σκοπούς (αστικό πράσινο, πλύσιμο δρόμων-πάρκων, πυρκαγιές).

Ο Κανονισμός 2020/741 της Ευρωπαϊκής Ένωσης καθορίζει τις ελάχιστες απαιτήσεις για την ασφαλή χρήση των επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων για άρδευση καλλιεργειών. Στον Πίνακα 2 και Πίνακα 3, παρακάτω, δίνονται αντίστοιχα, οι επιτρεπόμενες χρήσεις και τα ποιοτικά χαρακτηριστικά των επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων, ανάλογα με την Κατηγορία Ποιότητας του νερού. Στον Πίνακα 1 της Εισαγωγής δίνονται οι μονάδες επεξεργασίας αστικών λυμάτων στην Ελλάδα, που επαναχρησιμοποιούν το επεξεργασμένο νερό για άρδευση καλλιεργειών.

Δρόλια Ειρήνη: 'Αξιοποίηση αστικών υγρών αποβλήτων και αστικών στερεών βιοαποβλήτων για άρδευση και λίπανση καλλιέργειών'

Πίνακας 2: Επιτρεπόμενες χρήσεις σύμφωνα με τον Κανονισμό 2020/741.

Κατηγορία Ποιότητας Νερού	Επιτρεπόμενη χρήση	Μέθοδος άρδευσης
A	Οι καλλιέργειες που καταναλώνονται ωμές και το βρώσιμο τμήμα είναι σε άμεση επαφή με το επεξεργασμένο νερό.	Όλες
B	Οι καλλιέργειες που καταναλώνονται ωμές, με το βρώσιμο τμήμα να είναι πάνω από το έδαφος και να μην έρχεται σε επαφή με το νερό. Καθώς και οι καλλιέργειες που προορίζονται για ζώα, που παράγουν κρέας ή γάλα.	Όλες
C	Οι καλλιέργειες που καταναλώνονται ωμές με το βρώσιμο τμήμα να είναι πάνω από το έδαφος και να μην έρχεται σε επαφή με το νερό. Καθώς και οι καλλιέργειες που προορίζονται για ζώα, που παράγουν κρέας ή γάλα.	Στάγδην ή άλλη μέθοδος που εξασφαλίζει τη μη επαφή με το βρώσιμο μέρος της καλλιέργειας.
D	Σποροπαραγωγή, Βιομηχανικές και Ενεργειακές καλλιέργειες.	Όλες

Δρόλια Ειρήνη: 'Αξιοποίηση αστικών υγρών αποβλήτων και αστικών στερεών βιοαποβλήτων για άρδευση και λίπανση καλλιεργειών'

Πίνακας 3: Ποιοτικές απαιτήσεις σύμφωνα με τον Κανονισμό 2020/741.

Κατηγορία Ποιότητας Νερού	Ενδεικτική Τεχνολογία	E.colli (number/100ml)	BO D ₅ (mg/l)	TSS (mg/l)	Turbidity (NTU)	Άλλο
A	Δευτερογενή Επεξεργασία, Διήθηση, Απολύμανση	≤ 10	≤10	≤10	≤5	Legionella spp <1.000cfu/l (όπου υπάρχει κίνδυνος αερολύματος)
B	Δευτερογενή Επεξεργασία, Απολύμανση	≤100	25*	35*	-	Εντερικοί νηματώδεις (αυγά ελμίνθου) ≤ 1 αυγό/l(για άρδευση βοσκότοπου ή χορτονομής)
C	Δευτερογενή Επεξεργασία, Απολύμανση	≤1.000	25*	35*	-	
D	Δευτερογενή Επεξεργασία, Απολύμανση	≤10.000	25*	35*	-	

* Οδηγία 91/271/ΕΟΚ (Παράρτημα 1, Πίνακας 1)

Δρόλια Ειρήνη: 'Αξιοποίηση αστικών υγρών αποβλήτων και αστικών στερεών βιοαποβλήτων για άρδευση και λίπανση καλλιεργειών'

2.1 Τεχνολογίες επεξεργασίας

Για την επεξεργασία υγρών αποβλήτων χρησιμοποιούνται ποικίλες μέθοδοι φυσικές, χημικές ή συνδυασμός αυτών. Η επεξεργασία περιλαμβάνει διάφορα επίπεδα από προεπεξεργασία, πρωτοβάθμια, δευτεροβάθμια έως τριτοβάθμια ή προχωρημένη επεξεργασία, με τελικά προϊόντα συνήθως, το επεξεργασμένο νερό, που μπορεί να διατεθεί σε φυσικούς υδάτινους αποδέκτες ή να επαναχρησιμοποιηθεί, την ιλύ, που μετά από κατάλληλη επεξεργασία μπορεί να διατεθεί σε χωματερές ή να χρησιμοποιηθεί ως εδαφοβελτιωτικό ή ανακτώμενα θρεπτικά συστατικά, που μπορούν να απορροφηθούν από βιομηχανίες λιπασμάτων.

Κατά την προεπεξεργασία μπορεί να γίνει σχάρισμα, για την απομάκρυνση χονδρών στερεών, άλεση/πολτοποίηση, αμμοσυλλογή όπου σε κατάλληλες δεξαμενές γίνεται καθίζηση σωματιδίων, λιποσυλλογή όταν τα απόβλητα περιέχουν σημαντικές ποσότητες λιπών ή χρήση δεξαμενής εξισορρόπησης.

Η πρωτοβάθμια επεξεργασία, περιλαμβάνει τεχνικές όπως η καθίζηση, η επίπλευση, όπου φυσαλίδες αέρα συσσωματώνονται με στερεά σωματίδια μειώνοντας την πυκνότητά τους σε μικρότερη από εκείνη του νερού, με αποτέλεσμα τα σωματίδια να κινούνται προς τα επάνω. Άλλη τεχνική που εφαρμόζεται είναι η χημική κατακρήμνιση, που στηρίζεται στην εξουδετέρωση των απωστικών ηλεκτρικών δυνάμεων μεταξύ των κολλοειδών, οδηγώντας τα σε συσσωμάτωση και κροκίδωση, με αποτέλεσμα να βελτιώνεται η κατακρήμνιση.

Η δευτερογενή επεξεργασία περιλαμβάνει κατά κύριο λόγο την διαδικασία της ενεργούς ιλύος, όπου αποτελείται συνήθως από μια διάταξη δυο δεξαμενών, μιας αερισμού, όπου γίνεται η βιολογική οξείδωση των οργανικών και μια δεξαμενή δευτεροβάθμιας καθίζησης, όπου καθιζάνουν οι μικροοργανισμοί. Άλλες μέθοδοι δευτερογενούς επεξεργασίας είναι τα χαλικοδυλιστήρια ή οι βιοδίσκοι, όπου σε κατάλληλες διατάξεις (δεξαμενές με κατάλληλο πληρωτικό υλικό ή δίσκους σε άξονα βυθισμένους σε δεξαμενές) δημιουργούνται ευνοϊκές συνθήκες για την ανάπτυξη μικροοργανισμών, που καταναλώνουν το οργανικό φορτίο και το O₂ παράγοντας

Διπλωματική Εργασία

Δρόλια Ειρήνη: 'Αξιοποίηση αστικών υγρών αποβλήτων και αστικών στερεών βιοαποβλήτων για άρδευση και λίπανση καλλιεργειών'

CO₂. Σταδιακά η βιομάζα αποκολλάται και εν συνεχεία αναπτύσσεται νέο στρώμα βιομάζας.

Η εκροή της δευτεροβάθμιας επεξεργασίας εξακολουθεί συνήθως να έχει υψηλές συγκεντρώσεις αζώτου και φωσφόρου, που πρέπει να μειωθούν ώστε να αποφευχθούν προβλήματα ευτροφισμού από διάθεση σε υδάτινους αποδέκτες. Για αυτό σε πολλές περιπτώσεις εφαρμόζεται και τριτοβάθμια επεξεργασία για την απομάκρυνσή τους, που μπορεί να περιλαμβάνει φυσικές, χημικές ή βιολογικές διεργασίες.

Υπάρχουν και φυσικά συστήματα επεξεργασίας υγρών αποβλήτων όπως υγροβιότοποι - φυσικοί, τεχνητοί ή τεχνητές λίμνες. Τα ποιοτικά και ποσοτικά χαρακτηριστικά των λυμάτων, η γεωγραφική θέση και χωροταξία της περιοχής καθώς και κοινωνικοοικονομικοί λόγοι, θα συνεκτιμηθούν προκειμένου να επιλεγεί η κατάλληλη μέθοδος επεξεργασίας.

Δρόλια Ειρήνη: 'Αξιοποίηση αστικών υγρών αποβλήτων και αστικών στερεών βιοαποβλήτων για άρδευση και λίπανση καλλιέργειών'

2.2 Εφαρμοσμένες τεχνολογίες σε καλλιέργειες

Εξαιτίας των συνεχώς αυξανόμενων αναγκών εύρεσης διαθέσιμου νερού, η πρακτική της αξιοποίησης των αστικών υγρών αποβλήτων για άρδευση καλλιέργειών εφαρμόζεται όλο και περισσότερο, ωστόσο, δεν έχουν πραγματοποιηθεί αρκετές μελέτες για τις επιπτώσεις στις καλλιέργειες ή στα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά του εδάφους. Πρόκειται για ένα πεδίο που χρίζει περισσότερης μελέτης καθώς κάθε καλλιέργεια έχει τα δικά της χαρακτηριστικά και μπορεί να επηρεάζεται διαφορετικά, σύμφωνα πάντα και με τα ποιοτικά χαρακτηριστικά των εφαρμοσμένων επεξεργασμένων αστικών υγρών αποβλήτων.

Μια καλλιέργεια με ιδιαίτερο ενδιαφέρον για την Ελλάδα αλλά και την ευρύτερη περιοχή της Μεσογείου αποτελεί η καλλιέργεια της ελιάς. Πρόκειται για μια καλλιέργεια που παραδοσιακά ήταν προσαρμοσμένη στις κλιματικές συνθήκες και κάλυπτε τις ανάγκες της σε νερό μέσω των βροχοπτώσεων. Η κλιματική αλλαγή, όμως, με την αύξηση των θερμοκρασιών και την έντονη εμφάνιση φαινομένων ξηρασίας και λειψυδρίας, έχει αυξήσει τις ανάγκες της καλλιέργειας για άρδευση, γεγονός που απειλεί τους ελάχιστους διαθέσιμους υδάτινους πόρους στην περιοχή της Μεσογείου. Μια πολλά υποσχόμενη πρακτική της αντιμετώπισης έλλειψης νερού για την καλλιέργεια της ελιάς εμφανίζεται να είναι η χρήση επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων.

Οι Hassena et al (2022) εξέτασαν την άρδευση νεαρών δενδρυλλίων ελιάς με επεξεργασμένα υγρά απόβλητα. Τα χημικά χαρακτηριστικά του επεξεργασμένου νερού δίνονται στον Πίνακα 4. Συγκεκριμένα, πραγματοποίησαν τη μελέτη τους σε εμβολιασμένα με μυκκόριζα δενδρύλλια και σε μη εμβολιασμένα. Τα μυκκόριζα είναι μύκητες που έχουν την ιδιότητα να βελτιώνουν την ανάπτυξη των φυτών, να αυξάνουν την πρόσληψη νερού και θρεπτικών συστατικών και να ενισχύουν την ανεκτικότητα των φυτών σε πολυάριθμους στρεσογόνους παράγοντες (πχ αυξημένη αλατότητα).

Διπλωματική Εργασία

Δρόλια Ειρήνη: 'Αξιοποίηση αστικών υγρών αποβλήτων και αστικών στερεών βιοαποβλήτων για άρδευση και λίπανση καλλιιεργειών'

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η άρδευση με επεξεργασμένα υγρά απόβλητα νεαρών δενδρυλλίων ελιάς, που δεν ήταν εμβολιασμένα με μυκκόριζα, (για χρονικό διάστημα ενός έτους) επηρέασε πρωταρχικά τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά του εδάφους (Πίνακας 5). Το χρησιμοποιούμενο έδαφος είχε χαμηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα ($EC = 0,626 \text{ dS m}^{-1}$), καθώς και χαμηλή γονιμότητα με ποσοστό οργανικής ουσίας 0,92%. Τα περιεχόμενα Na^+ (52 mg kg^{-1}), Cl ($59,80 \text{ mg kg}^{-1}$), μακροθρεπτικά συστατικά N_i (ολικό άζωτο), P , K^+ , Ca^{2+} και μικροθρεπτικά συστατικά Zn^{2+} , Fe^{2+} και Cu^{2+} , ήταν επίσης σε σχετικά χαμηλά επίπεδα. Μετά από ένα χρόνο άρδευσης με επεξεργασμένα υγρά απόβλητα σημειώθηκαν κάποιες αλλαγές στις ιδιότητες του εδάφους. Χαρακτηριστικά, η ηλεκτρική αγωγιμότητα αυξήθηκε σημαντικά σε όλες τις επεμβάσεις, σε σύγκριση με την τιμή που μετρήθηκε στην αρχή της μελέτης (4,29 έως $12,13 \text{ εναντι } 0,626 \text{ dS m}^{-1}$). Όπως έδειξαν οι τιμές της ηλεκτρικής αγωγιμότητας, η αλατότητα αυξήθηκε, κάτι που μπορεί να αποδοθεί στην υψηλή συγκέντρωση Na^+ και Cl^- στα επεξεργασμένα υγρά απόβλητα. Επιπρόσθετα, η συσσώρευση ιόντων Na^+ και Cl^- στο έδαφος επηρέασε αρνητικά την διαθεσιμότητα θρεπτικών συστατικών στα φυτά. Όσον αφορά την γονιμότητα του εδάφους, εκφρασμένης ως περιεχόμενης οργανικής ουσίας, δεν διαπιστώθηκε καμία σημαντική διαφορά μεταξύ μη εμβολιασμένων εδαφών, που ποτίζονται με νερό βρύσης (0,78%) και με επεξεργασμένα υγρά απόβλητα (0,83%). Η περιεκτικότητα των μακροθρεπτικών συστατικών N_i , P και Ca^{2+} στο έδαφος δεν επηρεάστηκε σημαντικά από την εφαρμογή επεξεργασμένων αποβλήτων. Ωστόσο, σε σύγκριση με το έδαφος που αρδεύτηκε με νερό βρύσης, οι περιεκτικότητες N_i και P αυξήθηκαν κατά 7,40 και 26,11% αντίστοιχα, σε έδαφος που αρδεύτηκε με επεξεργασμένα απόβλητα.

Από την άλλη, με αντίστοιχη άρδευση σε εμβολιασμένα με μυκκόριζα φυτά, παρατηρήθηκε σημαντική βελτίωση της ποιότητας του εδάφους. Αυξήθηκε η περιεκτικότητά του σε μακροθρεπτικά συστατικά, βελτιώθηκε η γονιμότητα του και τα φυτά απορρόφησαν περισσότερο Zn και Cu από το έδαφος. Εμβολιασμός με μυκκόριζα προκάλεσε αύξηση N_i , P και Ca^{2+} στο εδαφικό διάλυμα, σε σύγκριση με

Διπλωματική Εργασία

Δρόλια Ειρήνη: 'Αξιοποίηση αστικών υγρών αποβλήτων και αστικών στερεών βιοαποβλήτων για άρδευση και λίπανση καλλιέργειών'

μη εμβολιασμένο έδαφος. Επιπλέον, καταγράφηκε σημαντική αύξηση της περιεκτικότητας σε οργανική ουσία του εδάφους υπό άρδευση με επεξεργασμένα υγρά απόβλητα (Εξαιρείται το εμβολιασμένο με *Gigaspora margarita*). Είναι ενδιαφέρον ότι παρατηρήθηκε μια σημαντική μείωση της περιεκτικότητας τόσο σε Na^+ όσο και σε Cl σε χόμα εμβολιασμένο με μυκκόριζα. Για παράδειγμα, η περιεκτικότητα σε Na^+ και Cl ήταν περίπου 900 και 488,66 mg kg^{-1} , αντίστοιχα σε έδαφος χωρίς εμβολιασμό που αρδεύτηκε με επεξεργασμένα απόβλητα, ενώ ήταν μόνο περίπου 750 και 402,39 mg kg^{-1} , αντίστοιχα σε εμβολιασμένο έδαφος αρδευόμενο με επεξεργασμένα απόβλητα. Η πρόταση της ερευνητικής ομάδας είναι ότι η αξιοποίηση μυκκόριζων σε καλλιέργεια ελιάς, θα μπορούσε να έχει μεγάλο ενδιαφέρον για άρδευση ελιάς με επεξεργασμένα υγρά απόβλητα, προκειμένου να αποφευχθούν προβλήματα αλατότητας στα φυτά και παράλληλα να βελτιωθεί η παραγωγή τους.

Πίνακας 4: Χημικά χαρακτηριστικά νερού βρύσης και επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων.

Νερό άρδευσης	pH	EC dsm^{-1}	P mg/L	K mg/L	Na mg/L	Cl mg/L	NO3- mg/L	NH4+ mg/L
Νερό βρύσης	7.74±0.34	2.28±0.06	0.01±0	10.00±1.00	370.00±14.14	592.07±10.64	1.49±0.25	2.02±0.07
Επεξ/ένα απόβλητα	7.95±0.27	5.84±0.40	4.23±0.29	66.67±2.89	730.00±10.00	1465.39±16.38	14.88±1.24	66.50±2.37

Διπλωματική Εργασία

Δρόλια Ειρήνη: 'Αξιοποίηση αστικών υγρών αποβλήτων και αστικών στερεών βιοαποβλήτων για άρδευση και λίπανση καλλιεργειών'

Πίνακας 5: Φυσικοχημικά χαρακτηριστικά αρχικού εδάφους και εδάφους μετά από τις αντίστοιχες επεμβάσεις.

OM	Na ⁺ mg kg ⁻¹	Cl ⁻ mg kg ⁻¹	N _t mg kg ⁻¹	P mg kg ⁻¹	K ⁺ mg kg ⁻¹	Ca ²⁺ mg kg ⁻¹	Zn ²⁺ mg kg ⁻¹	Fe ²⁺ mg kg ⁻¹	Cu ²⁺ mg kg ⁻¹
0.92±0.08	52.00±6.00	59.80±2.25	135.33±16.17	10.40±0.87	89.33±11.5	2666.67±305.51	46.12±5.82	1013.25±20.51	0.12±0.01
0.78±0.08c	406.67±41.63c	288.35±36.34b	126.00±12.12b	13.17±0.74c	142.67±2.31c	3666.67±115.47bc	10.48±0.34b	1127.83±35.58a	0.20±0.03b
0.83±0.00c	900.00±86.60a	488.66±27.71a	135.33±4.04b	16.61±0.41bc	220.00±20.00b	3600.00±346.41c	12.36±0.54a	1210.08±40.10a	0.27±0.03a
0.01±0.16ab	766.67±28.87b	438.44±17.49b	147.00±12.12ab	17.42±3.35b	253.33±11.55a	3800.00±200.00abc	12.68±0.40a	1311.33±229.08a	0.22±0.02b
0.87±0.08bc	750.00±50.00b	402.39±23.28bc	144.67±16.17ab	18.95±2.22b	273.33±11.55a	4266.67±416.33a	11.26±0.32b	1115.25±31.18a	0.24±0.01ab

Διπλωματική Εργασία

Δρόλια Ειρήνη: 'Αξιοποίηση αστικών υγρών αποβλήτων και αστικών στερεών βιοαποβλήτων για άρδευση και λίπανση καλλιεργειών'

EC	dsm ⁻¹	0.63±0.01	4.29±0.78b	12.13±0.2a	12.06±0.13a	11.53±0.04a
		1	2	3	4	5

1: Αρχικό έδαφος

2: Έδαφος αρδευόμενο με νερό βρύσης

3: Έδαφος αρδευόμενο με επεξεργασμένα απόβλητα

4: Εμβολιασμένο έδαφος με μυκκώριζα *Glomus deserticola*) αρδευόμενο με επεξεργασμένα απόβλητα

5: Εμβολιασμένο έδαφος με μυκκώριζα *Gigaspora margarita* αρδευόμενο με επεξεργασμένα απόβλητα

OM: Οργανική ουσία

EC: Ηλεκτρική αγωγιμότητα

Οι τιμές αντιπροσωπεύουν το μέσο όρο 3 επαναλήψεων ανά επέμβαση ± SD. Για τα τελικά χαρακτηριστικά του εδάφους, τα μέσα στην ίδια στήλη, που ακολουθούνται από το ίδιο γράμμα δεν διαφέρουν σημαντικά μεταξύ τους.

Δρόλια Ειρήνη: 'Αξιοποίηση αστικών υγρών αποβλήτων και αστικών στερεών βιοαποβλήτων για άρδευση και λίπανση καλλιέργειών'

Στο πλαίσιο αυτό, της αξιολόγησης της επίδρασης άρδευσης με επεξεργασμένα υγρά απόβλητα, πραγματοποιήθηκε πρόσφατα ερευνητική εργασία στην Τυνησία, όπου μελετήθηκε η καλλιέργεια φράουλας (Bakari et al, 2022). Στόχος της εργασίας ήταν λαμβάνοντας υπόψη την ευαισθησία της καλλιέργειας φράουλας (*Fragaria x ananassa* cv Camarosa) στην αλατότητα, να εκτιμηθεί η επίδραση της άρδευσης με επεξεργασμένα υγρά απόβλητα, συγκριτικά με την άρδευση νερού από πηγάδι, στην παραγωγικότητα της καλλιέργειας, στα χαρακτηριστικά του εδάφους, στην συγκέντρωση μετάλλων στους καρπούς, στην εκτίμηση κινδύνου για τον καταναλωτή. Στον Πίνακα 6 δίνονται τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά των τύπων νερού που χρησιμοποιήθηκε για την άρδευση της καλλιέργειας, νερό πηγαδιού (WW), επεξεργασμένα απόβλητα (TWW), αραιώσεις επεξεργασμένων αποβλήτων (D60: 60% νερό πηγαδιού και 40% επεξεργασμένα υγρά απόβλητα, αντίστοιχα D40 και D20), καθώς και όρια της Τυνησιακής νομοθεσίας (NT). Τα επεξεργασμένα απόβλητα (TWW) χαρακτηρίζονται με ουδέτερο pH (pH=7,84), η ηλεκτρική αγωγιμότητα έχει μια τιμή 5 mS/cm, που γενικά θεωρείται υψηλή για εκροή. Ωστόσο, αυτή η τιμή παραμένει κάτω από το όριο που ορίζει η νομοθεσία της Τυνησίας, σχετικά με την επαναχρησιμοποίηση TWW στη γεωργία.

Τα αποτελέσματα της μελέτης έδειξαν ότι συγκριτικά με την άρδευση με νερό από πηγάδι, η άρδευση με επεξεργασμένα υγρά απόβλητα βελτίωσε την γονιμότητα του εδάφους. Στον Πίνακα 7 παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά του εδάφους (υποστρώματος) πριν και μετά τις αντίστοιχες επεμβάσεις. Το έδαφος αρχικά χαρακτηρίζεται από ουδέτερο pH (pH=7,1), χαμηλή αγωγιμότητα (0,67 mS/cm) και TOC 27,5%. Μετά τις αντίστοιχες επεμβάσεις (αραίωση D60, D40, D20), δεν παρατηρούνται σημαντικές αλλαγές στο χρώμα για pH και NTK. Ωστόσο, η περιεκτικότητα σε TOC έδειξε σημαντική στατιστική διαφορά μεταξύ του εδάφους που ποτίστηκε με νερό πηγαδιού (WW) και με αραιώσης D20. Ακόμη, υπάρχουν σημαντικά στατιστικές διαφορές (*) στην ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC) και στο χλώριο (Cl) μεταξύ του εδάφους που ποτίστηκε με νερό πηγαδιού (WW) και με

Διπλωματική Εργασία

Δρόλια Ειρήνη: 'Αξιοποίηση αστικών υγρών αποβλήτων και αστικών στερεών βιοαποβλήτων για άρδευση και λίπανση καλλιέργειών'

αραιωμένα επεξεργασμένα απόβλητα. Η αύξηση του EC στο έδαφος συσχετίζεται απόλυτα με την συσσώρευση αλατιού. Η αραιώση, λοιπόν, των επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων στο 60% (D60: 60% νερό πηγαδιού και 40% επεξεργασμένα υγρά απόβλητα) έδειξε μικρότερη αλατότητα στο έδαφος σε σύγκριση με τις αραιώσεις 40% και 20%.

Στον Πίνακα 8 δίνεται η απόδοση της καλλιέργειας φράουλας (γραμμάρια καρπών ανά φυτό) σε σχέση με το νερό άρδευσης. Η μέση παραγωγή φράουλας ήταν σημαντικά υψηλότερη στα αρδευόμενα φυτά με WW (118 g ανά φυτό) σε σύγκριση με φυτά που ποτίζονται με D20 (48,24 g ανά φυτό) και D40 (74,32 g ανά φυτό). Ωστόσο, δεν καταγράφηκε σημαντική διαφορά μεταξύ της απόδοσης των φυτών που ποτίζονται από WW και D60. Η αραιώση, επομένως, των επεξεργασμένων αποβλήτων στο 60% έδωσε υψηλότερη απόδοση από τις άλλες αραιώσεις.

Τέλος, όλοι οι υδατικοί πόροι που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτή τη μελέτη δεν έδειξαν κανένα πιθανό κίνδυνο για την υγεία των καταναλωτών. Η εκτίμηση κινδύνου για την υγεία προσδιορίστηκε από τον δείκτη hazard index (HI) και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 9. Φαίνεται ότι ο δείκτης HI ήταν χαμηλότερος για τη φράουλα που ποτίστηκε με νερό πηγαδιού (0,202) σε σύγκριση με αυτή που ποτίστηκε με D60 (0,243), ακολουθούμενο από το D40 (0,293). Η υψηλότερη τιμή HI λήφθηκε για D20 (0,34) που περιείχε την υψηλότερη συγκέντρωση βαρέων μετάλλων. Ωστόσο, όλα τα αποτελέσματα HI ήταν κάτω από 1, γεγονός που αποδεικνύει την ασφάλεια όλων των φρούτων που παρήχθησαν σε αυτό το πείραμα.

Οι μελετητές, συνεκτιμώντας το σύνολο των αποτελεσμάτων, κατέληξαν ότι η άρδευση με αραιωμένα επεξεργασμένα υγρά απόβλητα στο 60%, θα μπορούσε να είναι μια βιώσιμη λύση στην άρδευση της ευαίσθητης στην αλατότητα φράουλας.

Δρόλια Ειρήνη: 'Αξιοποίηση αστικών υγρών αποβλήτων και αστικών στερεών βιοαποβλήτων για άρδευση και λίπανση καλλιέργειών'

Πίνακας 6: Χημικά χαρακτηριστικά νερού άρδευσης.

	WW	TWW	D60	D40	D20	NT
pH	7.11±0.2	7.84±0.28	7.63±0.4	7.52±0.45	7.45±0.4	6.5- 8.5
EC_{ms/cm}	0.48±0.17	5.17±0.39	4.57±0.41	3.43±0.4	2.69 ±0.18	7
NTK mg/L	1.8±0.38	56.23±1.97	46.1±1.69	35.1±1.74	23.4±2.89	
P mg/L	0.6±0.18	15.4±0.78	12.8±1.29	9.6±0.4	6.4±0.69	
K mg/L	5±0.85	30.5±2.42	25±1.78	19.1±2.16	12.7±1.85	
Na mg/L	31.8±1.93	204±1.71	170±1.76	127.5±1.71	85±1.56	
Cl mg/L	257±18.68	1780±55.66	1435.5±30.7	1002.5±11.35	741.7±11.39	

Πίνακας 7: Φυσικοχημικά χαρακτηριστικά εδάφους πριν και μετά τις επεμβάσεις.

	Αρχικό	WW	D60	D40	D20
pH	7.1 ± 0.45	7.92 ± 1.07	7.73 ± 1	7.96± 1.24	7.92 ± 1.17
EC ms/cm	0.67 ± 0.14*	0.76 ±0.13*	1.23± 0.25*	1.9± 0.14*	2.3 ± 0.16*
Cl mg/kg d.w	43.75 ± 3.16*	68.93 ± 5.4*	68.93± 5.4*	210.9±7.53*	283 ± 5.89*
NTK %	0.283 ± 0.03	0.26 ± 0.06	0.3 ± 0.06	0.31±0.07	0.33 ± 0.07
TOC %	27.5 ± 6.07	23.67 ± 5.41	29.71 ±7.31	29.81 ± 7.77	31.91 ± 6.9

*Σημαντική διαφορά

Πίνακας 8: Απόδοση καλλιέργειας σε σχέση με νερό άρδευσης.

	WW	D60	D40	D20
Απόδοση g/φυτό	118 ± 9.87 a	107.09 ± 11.1 a	74.32 ± 8.74 b	48.24 ± 7.7c

Τα διαφορετικά γράμματα αναφέρονται σε διαφορές μεταξύ των επεμβάσεων, όπου είναι το ίδιο γράμμα δεν υπάρχει σημαντική διαφορά.

Πίνακας 9: Εκτίμηση κινδύνου για την υγεία

	HI
WW	0.202±0.029b
D60	0.243±0.047b
D40	0.293±0.046ab
D20	0.34±0.054a

Τα διαφορετικά γράμματα αναφέρονται σε διαφορές μεταξύ των επεμβάσεων, όπου είναι το ίδιο γράμμα δεν υπάρχει σημαντική διαφορά

Διπλωματική Εργασία

Δρόλια Ειρήνη: 'Αξιοποίηση αστικών υγρών αποβλήτων και αστικών στερεών βιοαποβλήτων για άρδευση και λίπανση καλλιιεργειών'

3. ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΥΓΡΩΝ ΑΣΤΙΚΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ ΓΙΑ ΛΙΠΑΝΣΗ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΩΝ

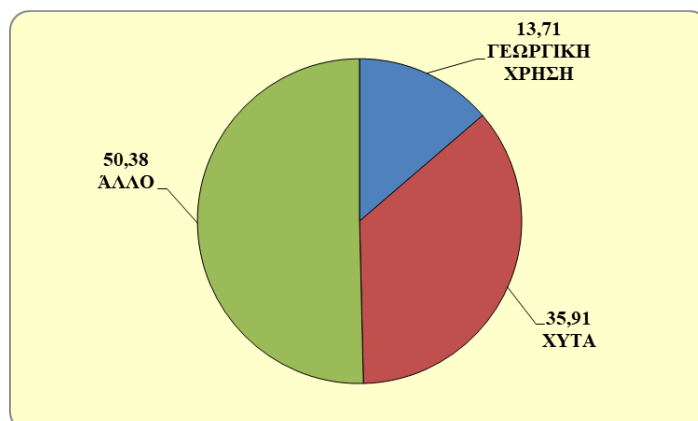
3.1 Αξιοποίησης ιλύος

Οι διαδικασίες επεξεργασίας των υγρών αποβλήτων, κυρίως η πρωτοβάθμια καθίζηση και διεργασία της ενεργούς ιλύος, παράγουν σημαντικές ποσότητες ιλύος. Η ιλύς αυτή μπορεί να διατεθεί στη θάλασσα, σε χώρους υγειονομικής ταφής αποβλήτων, να καεί ή να χρησιμοποιηθεί ως εδαφοβελτιωτικό. Στην Ελλάδα σύμφωνα με στοιχεία της Eurostat την περίοδο 2011-2018, ένα ποσοστό 13,71% διατέθηκε για γεωργική χρήση, ένα 35,91% αποτέθηκε σε ΧΥΤΑ ενώ ποσοστό 50,38% αναφέρεται ως άλλη διάθεση (Πίνακας 10, Σχήμα 1).

Πίνακας 10: Διάθεση ιλύος την περίοδο 2011-2018 στην Ελλάδα (<https://ec.europa.eu/eurostat>, Sewage sludge production and disposal).

	ΟΛΙΚΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ- ΔΙΑΘΕΣΗ	ΓΕΩΡΓΙΚΗ ΧΡΗΣΗ	ΧΥΤΑ	ΆΛΛΟ
2018	103,28	10,19	36,83	56,26
2017	103,28	10,19	36,83	56,26
2016	119,77	21,53	34,03	64,21
2015	119,77	21,53	34,03	64,21
2014	116,11	22,79	39,03	54,29
2013	113,04	22,57	37,05	53,42
2012	118,62	14,2	40,3	64,12
2011	147	6	79,8	61,2
	940,87	129	337,9	473,97
Μ.Ο	117,61	16,13	42,24	59,25
ΠΟΣΟΣΤΟ		13,71	35,91	50,38

Δρόλια Ειρήνη: 'Αξιοποίηση αστικών υγρών αποβλήτων και αστικών στερεών βιοαποβλήτων για άρδευση και λίπανση καλλιέργειών'



Σχήμα 1: Σχηματική απόδοση της διάθεσης ιλύος στην Ελλάδα την περίοδο 2011-2018.

Παρατηρεί κανείς ότι το ποσοστό ιλύος που αξιοποιείται στη γεωργία στον ελλαδικό χώρο είναι σχετικά χαμηλό. Ωστόσο, η χρήση της ιλύος στη γεωργία αποτελεί μια εναλλακτική και βιώσιμη πρακτική, για την αύξηση της γονιμότητας των εδαφών και παράλληλα μείωση της διάθεσης της ιλύος σε χώρους υγειονομικής ταφής ή αποτέφρωσή της. Σε πολλές χώρες (πχ Ισπανία) η διάθεση ιλύος σε καλλιεργούμενα εδάφη είναι μια ευρέως χρησιμοποιούμενη μέθοδος (Elif et al, 2021). Με την διάθεση της ιλύος στο έδαφος στόχος είναι ο εμπλουτισμός του με πολύτιμα θρεπτικά συστατικά όπως το άζωτο και ο φώσφορος καθώς και με οργανική ύλη. Η οργανική ύλη διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στη μείωση της διάβρωσης του εδάφους, στον αερισμό του, στην ικανότητα συγκράτησης νερού, στην αύξηση της διαθεσιμότητας θρεπτικών συστατικών και της παραγωγικότητας της καλλιέργειας.

Παρόλα αυτά δεν πρέπει να παραβλέπει κανείς ότι υπάρχουν περιορισμοί στην χρησιμοποίηση της ιλύος στην γεωργία, καθώς υπάρχει πιθανότητα να περιέχει ανεπιθύμητα συστατικά, όπως βαρέα μέταλλα, παθογόνους μικροοργανισμούς, οργανικούς ρύπους, μικροπλαστικά ή άλλους αναδυόμενους ρύπους (πχ φαρμακευτικές ουσίες), που ενδεχομένως να επηρεάσουν αρνητικά την υγεία του ανθρώπου ή να επιβαρύνουν το περιβάλλον. Συχνά στην ενεργό ιλύ συναντώνται μόλυβδος, κάδμιο και ψευδάργυρος. Χαρακτηριστικά, σε έκθεση της Ευρωπαϊκής

Διπλωματική Εργασία

Δρόλια Ειρήνη: 'Αξιοποίηση αστικών υγρών αποβλήτων και αστικών στερεών βιοαποβλήτων για άρδευση και λίπανση καλλιεργειών'

Επιτροπής, με έτος αναφοράς το 2010, βρέθηκε ότι με εφαρμογή ύλους στα καλλιεργούμενα εδάφη προστέθηκαν 6 t/έτος καδμίου, 268 t/έτος μολύβδου και 2851 t/έτος ψευδαργύρου (De Vries et al, 2022)

Στην Ελλάδα η ΚΥΑ 80568/4225/1991, σε εναρμόνιση πάντα με την Οδηγία 86/278/ΕΟΚ "Σχετικά με την προστασία του περιβάλλοντος και ιδίως του εδάφους κατά την χρησιμοποίηση της ύλους καθαρισμού λυμάτων στη γεωργία", ορίζει τις μεθόδους, τους όρους και τους περιορισμούς για την αξιοποίηση στη γεωργία της ύλους, που προέρχεται από την επεξεργασία αστικών λυμάτων. Συγκεκριμένα, καθορίζονται οι οριακές τιμές των συγκεντρώσεων βαρέων μετάλλων στην ύ (Πίνακας 11), που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί στη γεωργία και οι αντίστοιχες τιμές για τα εδάφη (Πίνακας 12) που πρόκειται να δεχθούν την ύ. Είναι ενδιαφέρον να επισημανθεί ότι μέχρι σήμερα δεν υπάρχουν ενιαία πρότυπα για το έδαφος σε ευρωπαϊκό επίπεδο. Παρά τις προσπάθειες εναρμόνισης μεταξύ των κρατών, τα περισσότερα διαθέτουν εθνικό πλαίσιο προτύπων για το έδαφος. Ωστόσο, τα ανώτερα επίπεδα κρίσιμων ορίων είναι κοινά για όλη την ΕΕ (De Vries et al, 2022) .

Πίνακας 11: Οριακές συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων στην ύ για διάθεση στο έδαφος (ΚΥΑ 80568/4225/1991).

Βαρέα μέταλλα	Οριακές συγκεντρώσεις mg/kg ξηρής ουσίας
Κάδμιο	20-40
Χαλκός	1000-1750
Νικέλιο	300-400
Μόλυβδος	750-1200
Ψευδάργυρος	2500-4000
Υδράργυρος	16-25

Διπλωματική Εργασία

Δρόλια Ειρήνη: 'Αξιοποίηση αστικών υγρών αποβλήτων και αστικών στερεών βιοαποβλήτων για άρδευση και λίπανση καλλιέργειών'

Πίνακας 12: Οριακές συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων στο έδαφος (ΚΥΑ 80568/4225/1991).

Βαρέα μέταλλα	Οριακές συγκεντρώσεις mg/kg ξηρής ουσίας
Κάδμιο	1-3
Χαλκός	50-140
Νικέλιο	30-75
Μόλυβδος	50-300
Ψευδάργυρος	150-300
Υδράργυρος	1-1,5

Η ίδια ΚΥΑ ορίζει ότι απαγορεύεται η χρήση της ιλύος

α) Σε λειμώνες ή εκτάσεις καλλιέργειας ζωοτροφών, εφόσον οι λειμώνες πρόκειται να χρησιμοποιηθούν για βοσκή ή οι ζωοτροφές πρόκειται να συγκομισθούν πριν από την πάροδο ενός ορισμένου χρονικού διαστήματος. Για τον καθορισμό του χρονικού αυτού διαστήματος λαμβάνονται υπόψη η γεωγραφική και κλιματολογική τους κατάσταση και δεν μπορεί να είναι κατώτερο από τρεις εβδομάδες.

β) Σε καλλιέργειες οπωροκηπευτικών κατά την περίοδο της βλάστησης, με εξαίρεση τις καλλιέργειες οπωροφόρων δένδρων.

γ) Σε εδάφη που προορίζονται για καλλιέργειες οπωροκηπευτικών οι οποίες συνήθως βρίσκονται σε άμεση επαφή με το έδαφος και κανονικά καταναλίσκονται σε νωπή κατάσταση, για περίοδο δέκα μηνών πριν από τη συγκομιδή και κατά τη διάρκεια της συγκομιδής.

Άλλο κρίσιμο κριτήριο για την αξιοποίηση της ιλύος στη γεωργία είναι η φόρτισή της με παθογόνους μικροοργανισμούς, όπως εντερικά παράσιτα, πρωτόζωα. Ένας παγκόσμιος συντελεστής για την χρησιμοποίηση της ιλύος στη γεωργία είναι η συγκέντρωση αυγών ελμινθών. Το 2006 ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας πρότεινε

Διπλωματική Εργασία

Δρόλια Ειρήνη: 'Αξιοποίηση αστικών υγρών αποβλήτων και αστικών στερεών βιοαποβλήτων για άρδευση και λίπανση καλλιεργειών'

ένα βιώσιμο όριο περιεκτικότητας σε αυγά ελμινθών 1 αυγό/γρ ολικών στερεών στην ιλύ (Sabbahi et al, 2022). Στην Ελλάδα και σε κάποιες άλλες χώρες όπως Πορτογαλία, Σλοβακία, Δανία, Φινλανδία, Ιταλία, Τουρκία, καθώς και στις περισσότερες αραβικές χώρες δεν έχουν καθοριστεί οριακές τιμές για τα αυγά των ελμινθών.

Μελέτη σε αποξηραμένη ιλύ στην Τυνησία (Sabbahi et al, 2022), έδειξε χαμηλή συγκέντρωση εντερικών παρασίτων και συμμόρφωση με το όριο που έχει θέσει ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας, καθώς η μέση συγκέντρωση κατά τα τρία χρόνια διεξαγωγής της έρευνας, ήταν λιγότερο από 1 αυγό ελμινθών /100 γρ ξηρής ουσίας. Οι μελετητές κατέληξαν ότι η ηλιακή ξήρανση της ιλύος σε κλίνες είναι μια τεχνική που εγγυάται παραγωγή ασφαλούς υλικού για γεωργική χρήση, από πλευράς παθογόνων μικροοργανισμών.

Επιπρόσθετη ανησυχία για την αξιοποίηση της ιλύος στον αγροτικό τομέα δημιουργούν και ποικίλοι αναδυόμενοι ρύποι, όπως τα φαρμακευτικά υπολείμματα. Για την ώρα στη χώρα μας δεν υπάρχει κάποιο νομοθετικό πλαίσιο για την παρουσία φαρμακευτικών ουσιών στην ιλύ, προκειμένου να χρησιμοποιηθεί σε καλλιεργούμενο έδαφος. Βέβαια, καθώς η παρουσία φαρμακευτικών ουσιών έχει διαπιστωθεί σε επεξεργασμένη ιλύ (Aydin et al, 2022), είναι σημαντικό να βελτιωθούν οι μέθοδοι επεξεργασίας της ιλύος ή οι μέθοδοι απομάκρυνσης αναδυόμενων ρύπων από τις μονάδες επεξεργασίας αστικών λυμάτων, ώστε να αποφευχθεί η εναπόθεση αυτών των ρύπων στο περιβάλλον.

Η διάθεση της ιλύος, λοιπόν, προαπαιτεί την επεξεργασία της δηλαδή μείωση του οργανικού φορτίου, καταστροφή παθογόνων μικροοργανισμών, αφυδάτωσή της. Οι διεργασίες επεξεργασίας της ιλύος περιλαμβάνουν προεπεξεργασία της, μέσω άλεσης, ανάμειξης ή εξάμμωσης. Σημαντικό στάδιο επεξεργασίας της ιλύος είναι η πύκνωση, όπου απομακρύνεται το μεγαλύτερο μέρος του νερού, ώστε να μειώνεται σημαντικά η παροχή στα περαιτέρω στάδια. Η πύκνωση πραγματοποιείται συνήθως με καθίζηση, επίπλευση ή φυγοκέντριση. Το κρισιμότερο στάδιο επεξεργασίας της

Διπλωματική Εργασία

Δρόλια Ειρήνη: 'Αξιοποίηση αστικών υγρών αποβλήτων και αστικών στερεών βιοαποβλήτων για άρδευση και λίπανση καλλιεργειών'

ύλος είναι η σταθεροποίησή της. Η καταστροφή δηλαδή παθογόνων μικροοργανισμών, η εξουδετέρωση οσμών και η αποφυγή σηπτικότητας της. Η σταθεροποίηση επιτυγχάνεται με φυσικοχημικές διεργασίες όπως η προσθήκη χλωρίου, ασβέστη ή θερμική επεξεργασία (260°C). Αλλά και με βιολογικές διεργασίες όπως η αερόβια και αναερόβια χώνευση. Ακολουθεί η προετοιμασία της ύλος για αφυδάτωση και η απολύμανση για καταστροφή των παθογόνων μικροοργανισμών.

Αρκετά διαδεδομένη μέθοδος επεξεργασίας της ύλος αποτελεί η κομποστοποίησή της (βιοσταθεροποίηση), με τελικό προϊόν αρκετά σταθεροποιημένο εδαφοβελτιωτικό. Στη διεργασία αυτή η ύλος αποτίθεται σε κατάλληλα συστήματα κομποστοποίησης, σειράδια, αεριζόμενους στατικούς σωρούς ή κλειστούς βιοαντιδραστήρες και επιτυγχάνεται αερόβια βιολογική αποδόμηση.

Διάθεση κομποστοποιημένης ύλος σε σπορόφυτα ζαχαροκάλαμου έδειξε, ότι μπορεί να μειώσει τις ανάγκες σε ανόργανο λίπασμα και να βελτιώσει την ποιότητα του καλλιεργούμενου εδάφους (Silva et al, 2022). Η εφαρμογή κομποστοποιημένης ύλος σε δόσεις από 2,5 -7,5 Mg ha⁻¹ δεν άλλαξε την περιεκτικότητα του εδάφους σε οργανική ουσία. Ωστόσο, εφαρμογή 5,0 Mg ha⁻¹ κομποστοποιημένης ύλος με προσθήκη λιπάσματος, κάλυψης 50% των αναγκών της καλλιέργειας ή χωρίς προσθήκη, παρείχε τις υψηλότερες τιμές pH, P, K, Ca, Mg, Cu και Zn, καθώς και υψηλή ικανότητα ιοντοανταλλαγής.

Οι μέθοδοι επεξεργασίας της ύλος έχει αποδειχθεί ότι επηρεάζουν τις φυσικοχημικές ιδιότητές της και συνεπώς αναπόφευκτα τις επιδόσεις εφαρμογής της σε γεωργική γη. Για παράδειγμα σε καλλιέργεια μαρουλιού (Zhang et al, 2022), εφαρμογή ύλος από 4 διαφορετικές μεθόδους επεξεργασίας (χωρίς προεπεξεργασία, από αναερόβια χώνευση, από κροκίδωση, από πήξη, από προηγμένη οξείδωση και μάρτυρα χωρίς προσθήκη ύλος), τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η ανεπεξέργαστη ύλος και αυτή από αναερόβια χώνευση, είχαν καλύτερη επίδραση στην ανάπτυξη του μαρουλιού, η χρήση ύλος από αναερόβια χώνευση έδωσε 17 φύλλα έναντι 15 και 14

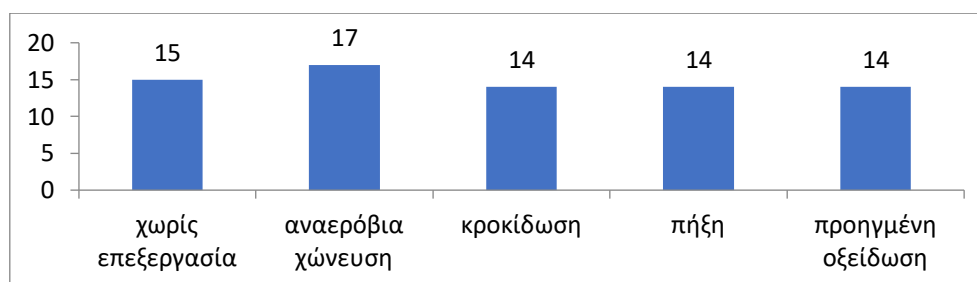
Διπλωματική Εργασία

Δρόλια Ειρήνη: 'Αξιοποίηση αστικών υγρών αποβλήτων και αστικών στερεών βιοαποβλήτων για άρδευση και λίπανση καλλιεργειών'

(Σχήμα 2). Παράλληλα, ίδιας προέλευσης ιλύς έδωσε μικρότερες συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων, τόσο στο έδαφος όσο και στα φυτά. Ο βαθμός ρύπανσης από βαρέα μέταλλα, εκτιμήθηκε χρησιμοποιώντας τον δείκτη I (Nemerow integrated pollution index), που προκύπτει από την ανάλυση των συγκεντρώσεων βαρέων μετάλλων (Cr, Mn, Cu, Zn, As, Cd, Pb) για το έδαφος και τα φυτά, και δίνεται στον Πίνακα 13.

Γενικά, η χημική επεξεργασία της ιλύος φαίνεται ότι δεν είναι η ενδεδειγμένη για μετέπειτα γεωργική χρήση Αντίθετα, οι φυσικές μέθοδοι προεπεξεργασίας δείχνουν πλεονεκτήματα για χρήση στη γεωργία (Zhang et al, 2022). Ένα πεδίο που χρίζει περαιτέρω μελέτης είναι η επίδραση της επεξεργασμένης ιλύος στην καλλιεργούμενη γη σε βάθος χρόνου.

Σχήμα 2: Αριθμός φύλλων σε σχέση με τον τύπο ιλύος που εφαρμόστηκε.



Πίνακας 13: Αξιολόγηση της ρύπανσης από βαρέα μέταλλα στο έδαφος και το φυτό, σε σχέση με τον τύπο ιλύος που εφαρμόστηκε.

	Έδαφος	Μαρούλι
Τύπος Ιλύος	I	I
Μάρτυρας (χωρίς ιλύ)	1,00	1,00
Ιλύς χωρίς επεξεργασία	1,15	1,10
Από αναερόβια χώνευση	1,17	1,00
Από κροκίδωση	1,23	1,27
Από πήξη	1,22	1,37
Από προηγμένη οξείδωση	1,48	1,32

Διπλωματική Εργασία

3.2 Ανάκτηση φωσφόρου και αζώτου από υγρά αστικά απόβλητα.

Οι φυσικοί πόροι τείνουν να εξαντληθούν, προκειμένου να ανταποκριθούν στις ανάγκες του αυξανόμενου πληθυσμού της γης. Εκτιμάται, ότι τα αποθέματα φωσφόρου θα εξαντληθούν στα επόμενα 50-100 χρόνια, ενώ παράλληλα η ζήτηση φωσφόρου αυξάνεται κατά 2,5% περίπου ετησίως (Marcinczyk et al, 2022). Το άζωτο υπάρχει άφθονο στην ατμόσφαιρα σχεδόν 80% αλλά ως αέριο άζωτο, στις αντιδραστικές του μορφές ως αμμώνιο, νιτρώδες ή νιτρικό, που είναι απαραίτητες για την ανάπτυξη των φυτών, η περιεκτικότητά του είναι περιορισμένη.

Γενικά, η ακατάλληλη, άκαιρη και υπερβολική εφαρμογή λιπασμάτων έχει ως αποτέλεσμα την σπατάλη αποθεμάτων, την ρύπανση υπόγειων υδάτων ή τη συσσώρευση στο έδαφος και υποβάθμισή του ή εμφάνιση φαινομένων ευτροφισμού των επιφανειακών υδάτων. Κρίνεται, λοιπόν, επιβεβλημένη η εφαρμογή μιας βιώσιμης στρατηγικής, που θα διασφαλίζει την ορθή χρήση λιπασμάτων και την ορθή διαχείριση φυσικών πόρων και πρώτων υλών. Με έτος αναφοράς το 2010, καταγράφηκε ότι στα καλλιεργούμενα ευρωπαϊκά εδάφη αποτέθηκαν 145 kg N/ha το έτος και 16, 9 kg/ha το έτος, από τα οποία τα 56 kg N/ha και 9,1 kg N/ha, αντίστοιχα προέρχονταν από κοπριά, κομποστ και ενεργό ιλύ (De Vries et al, 2022). Μια δυνατότητα που συνάδει με μια τέτοια βιώσιμη στρατηγική είναι η αξιοποίηση θρεπτικών συστατικών, που υπάρχουν στα αστικά υγρά απόβλητα, για παραγωγή λιπασμάτων. Η παγκόσμια παραγωγή αστικών λυμάτων εκτιμάται στα $359,4 \cdot 10^9$ m³/έτος, από αυτά το 63% συλλέγεται και το 52% υπόκειται σε επεξεργασία ενώ το 48 % διατίθεται στο περιβάλλον χωρίς επεξεργασία (Marcinczyk et al, 2022). Τα συγκεκριμένα απόβλητα περιέχουν πολύτιμα θρεπτικά συστατικά για την ανάπτυξη των φυτών όπως N, P, K, Ca, Cu, Fe, Mn, Zn και Mg και η ανάκτησή τους από τα λύματα αποκτά όλο και περισσότερο ενδιαφέρον.

Δρόλια Ειρήνη: 'Αξιοποίηση αστικών υγρών αποβλήτων και αστικών στερεών βιοαποβλήτων για άρδευση και λίπανση καλλιιεργειών'

Το άζωτο στα αστικά υγρά απόβλητα κυμαίνεται από 20-85 mg ολικού αζώτου στο λίτρο. Ποσοστό 40% είναι οργανικό και 60% σε μορφή ιόντων αμμωνίου σε pH 6-7. Ο φώσφορος κυμαίνεται στα 4-16mg/L. Η συνολική ανάκτηση φωσφόρου από τα υγρά αστικά απόβλητα εκτιμάται ότι θα ικανοποιούσε το 15-20% της παγκόσμιας ζήτησης (Marcinczyk et al, 2022). Τα ποσοστά ανάκτησης θρεπτικών συστατικών από υγρά απόβλητα κυμαίνονται από 65-90%, με την εφαρμογή ποικίλων συστημάτων – διεργασιών (Gowd et al, 2022).

Η ανάκτηση μπορεί να πραγματοποιηθεί με βιολογικές μεθόδους, χημικές μεθόδους ή μέσω προσρόφησης. Οι βιολογικές μέθοδοι απαιτούν διαθέσιμη βιομάζα, εξαρτώνται από τη θερμοκρασία, απαιτούν περαιτέρω επεξεργασία και έχουν μεσαίο λειτουργικό κόστος. Οι χημικές μέθοδοι εξαρτώνται από θερμοκρασία και pH και έχουν υψηλό λειτουργικό κόστος. Οι διαδικασίες προσρόφησης είναι απλές, εξαρτώνται και αυτές από θερμοκρασία και pH, δεν απαιτούν περαιτέρω επεξεργασία απαιτούν όμως προεπεξεργασία, έχουν μεσαίο λειτουργικό κόστος και επιπλέον είναι δαπανηρή η αναγέννηση των προσροφητικών. Υπάρχει μια σημαντική διαφορά μεταξύ της αφαίρεσης θρεπτικών (N, P) και της ανάκτησής τους. Στην πρώτη περίπτωση επιθυμούμε η εκροή να μην έχει σχεδόν καθόλου άζωτο και φώσφορο ή να υπάρχουν σε επιτρεπτά όρια, στην δεύτερη περίπτωση εστιάζουμε στην απόκτηση υποπροϊόντων, που μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν και είναι πλούσια με θρεπτικά συστατικά (N, P).

Η χημική καθίζηση είναι μια από τις χρησιμοποιούμενες διεργασίες ανάκτησης. Το N και ο P ανακτώνται ως στρουβίτης, που μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως λίπασμα, μέσω καθίζησης των επεξεργασμένων αστικών υγρών αποβλήτων με προσθήκη ενώσεων Mg. Το ποσοστό ανάκτησης κυμαίνεται στο 80-85%. Άλλη αποδοτική διεργασία ανάκτησης είναι η ιοντοανταλλαγή (ion exchange), όπου προσροφητικά υλικά όπως ο ζεόλιθος ή ο κλινοπτιλόλιθος, δρουν επιλεκτικά για την απομάκρυνση ιόντων αμμωνίου και φωσφορικών από υγρά απόβλητα. Το αποτέλεσμα είναι να ανακτώνται προϊόντα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως λιπάσματα όπως

Διπλωματική Εργασία

Δρόλια Ειρήνη: 'Αξιοποίηση αστικών υγρών αποβλήτων και αστικών στερεών βιοαποβλήτων για άρδευση και λίπανση καλλιέργειών'

MgNH₄PO₄ και NH₄NO₃. Η απόδοση της ιοντοανταλλαγής για ανάκτηση N και P είναι 80-90% (Gowd et al, 2022).

Μια διεργασία απομάκρυνσης που συγκεντρώνει μεγάλο ενδιαφέρον είναι η καλλιέργεια μικροφυκών. Με τη χρήση του συστήματος αυτού είναι δυνατή η βιοαποκατάσταση των λυμάτων, η ανάκτηση θρεπτικών και η παραγωγή βιομάζας μικροφυκών, που μπορεί να αξιοποιηθεί για άλλες χρήσεις, όπως παραγωγή βιοκαυσίμων (βιοαιθανόλη, βιουδρογόνο, βιοαέριο), βιολιπάσματα, βιοδιεγέρτες ή ανανεώσιμες πηγές βιοπλαστικών.

Τα μικροφύκη έχουν την ικανότητα να χρησιμοποιούν ανόργανο N και P για την ανάπτυξή τους, καθώς παράλληλα παράγουν οξυγόνο κατά την διάρκεια της φωτοσύνθεσης. Επιπρόσθετα, τα μικροφύκη έχουν την ικανότητα να ανέχονται ευρείες συνθήκες pH, θερμοκρασίας, αλατότητας ή συγκεντρώσεις CO₂, επομένως είναι κατάλληλα για καλλιέργεια σε υγρά απόβλητα. Σημαντικό είναι ακόμα ότι τα μικροφύκη μειώνουν τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου καθώς απορροφούν μέρος του άνθρακα, που παράγεται από την επεξεργασία των λυμάτων και θα ελευθερωνόταν ως CO₂ (Diaz et al, 2022).

Η καλλιέργεια μικροφυκών για την επεξεργασία υγρών αποβλήτων συγκεντρώνει αρκετά πλεονεκτήματα όπως

- Χαμηλότερο κόστος επεξεργασίας
- Αφαίρεση θρεπτικών σε πολύ χαμηλές συγκεντρώσεις
- Η βιομάζα που παράγεται μπορεί να μετατραπεί σε προϊόντα προστιθέμενης αξίας.

Η προσρόφηση σε biochar – Βιοεξανθρακώματα αποτελεί μια ακόμη διεργασία οικονομική, αποδοτική και φιλική για το χρήστη, προκειμένου να απομακρυνθούν θρεπτικά από τα υγρά απόβλητα. Το biochar πέρα από την ικανότητα ανάκτησης θρεπτικών, αποτελεί και πηγή μικρο και μακροθρεπτικών συστατικών, ώστε μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ως λίπασμα βραδείας αποδέσμευσης. Πρόκειται για ένα

Διπλωματική Εργασία

Δρόλια Ειρήνη: 'Αξιοποίηση αστικών υγρών αποβλήτων και αστικών στερεών βιοαποβλήτων για άρδευση και λίπανση καλλιιεργειών'

στερεό υλικό που παράγεται από την πυρόλυση βιομάζας, από στερεά βιοαπόβλητα, ζωικά απόβλητα ή ιλύ επεξεργασμένων αστικών υγρών αποβλήτων. Η θερμοκρασία πυρόλυσης φαίνεται να επηρεάζει τις φυσικοχημικές παραμέτρους των βιοεξανθρακωμάτων. Είναι ένα υλικό που διαθέτει εξαιρετικές ιδιότητες όπως μεγάλη ειδική επιφάνεια, ικανότητα ρύθμισης του pH και ανταλλαγής ιόντων. Επιπρόσθετα, έχει θετική επίδραση σε φυσικοχημικά χαρακτηριστικά του εδάφους πχ δεσμεύει τοξικούς ρύπους (βαρέα μέταλλα), διεγείρει τη μικροβιακή δραστηριότητα του εδάφους.

Τα ιόντα αμμωνίου (NH_4^+N) είναι η κύρια μορφή αζώτου στα υγρά απόβλητα, η απορρόφησή του βασίζεται στους χημικούς δεσμούς και στις ηλεκτροστατικές αλληλεπιδράσεις μεταξύ των αρνητικά φορτισμένων βιοεξανθρακωμάτων και των θετικά φορτισμένων ιόντων NH_4^+N . Το pH επίσης διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην προσρόφηση, τιμές pH 4-8 δίνουν σημαντική προσρόφηση, pH 3-4 χαμηλή ενώ σε τιμές $\text{pH} > 8$ η προσρόφηση μειώνεται ξανά. Ακόμα, αύξηση μάζας βιοεξανθρακωμάτων (0,1-1 gr), αυξάνει την ποσότητα του προσροφούμενου NH_4^+N , λόγω μεγαλύτερου αριθμού διαθέσιμων θέσεων προσρόφησης. Ωστόσο, αύξηση μάζας πάνω από 1 gr δεν αύξησε την προσρόφηση (Marcinczyk et al, 2022).

Εκτός από τα ιόντα αμμωνίου NH_4^+N τα λύματα περιέχουν και ιόντα NO_3^- . Τα ιόντα αυτά σε αρκετές μελέτες έχουν δείξει οριακή ή χαμηλή προσρόφηση από βιοεξανθρακώματα, που αποδίδεται στην ηλεκτροστατική απόθεση μεταξύ της αρνητικά φορτισμένης επιφάνειάς τους και των ιόντων NO_3^- . Παράλληλα, όσον αφορά τα ιόντα $\text{PO}_4^- \text{P}$, που επίσης συναντώνται στα υγρά απόβλητα, η απορρόφησή τους, όπως και στην περίπτωση των NO_3^- , αναστέλλεται από την ηλεκτροστατική απόθεση των ανιόντων από την αρνητικά φορτισμένη επιφάνεια των βιοεξανθρακωμάτων. Γενικά, η προσρόφηση του φωσφόρου από τα biochar εξαρτάται από την συγκέντρωση και την διαθεσιμότητα των ιόντων στο ανόργανο κλάσμα αλλά και από την θερμοκρασία πυρόλυσης που παράχθηκε το biochar.

Διπλωματική Εργασία

Δρόλια Ειρήνη: 'Αξιοποίηση αστικών υγρών αποβλήτων και αστικών στερεών βιοαποβλήτων για άρδευση και λίπανση καλλιεργειών'

Βιοξανθρακώματα που παράχθηκαν σε υψηλότερη θερμοκρασία πυρόλυσης απορροφούν περισσότερο $\text{PO}_4^- \text{P}$ (Marcinczyk et al, 2022).

Άλλη διεργασία ανάκτησης θρεπτικών είναι η προαναφερθείσα στην προηγούμενη ενότητα αξιοποίηση της ιλύος στον αγροτικό τομέα, όπου η ιλύς εφαρμόζεται ως λίπασμα πλούσιο σε N, P και οργανική ουσία.

Δρόλια Ειρήνη: 'Αξιοποίηση αστικών υγρών αποβλήτων και αστικών στερεών βιοαποβλήτων για άρδευση και λίπανση καλλιεργειών'

4. ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΣΤΕΡΕΩΝ ΑΣΤΙΚΩΝ ΒΙΟΑΠΟΒΛΗΤΩΝ.

Τα κράτη μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης είναι ήδη υποχρεωμένα να μειώσουν τις ποσότητες των αστικών στερεών αποβλήτων (ΑΣΑ), που αποστέλλονται σε χώρους υγειονομικής ταφής. Η Οδηγία πλαίσιο 98/2008 θέτει ως στόχο τη χωριστή συλλογή του 10% των παραγόμενων βιοαποβλήτων σε κάθε δήμο έως το 2030, και μέγιστο ποσοστό ταφής σε ΧΥΤΑ 10% έως το 2035. Προκειμένου λοιπόν να υπάρξει συμμόρφωση με τις απαιτήσεις που έχουν οριστεί, γίνεται υιοθέτηση μιας σειράς μέτρων. Το αποτέλεσμα είναι να έχει σημειωθεί αύξηση των ποσοτήτων των απορριμμάτων που οδηγούνται σε ανακύκλωση.

Στην Ελλάδα η ανακύκλωση του συστήματος διαχωρισμού στην πηγή (SSS), αυξήθηκε από 790.000 t (15%) το 2015, σε 913.000 t (16,5%) το 2018. Τα βιοαπόβλητα αυξήθηκαν αντίστοιχα από 109.000 t (4,7%) σε 139.000 t (5,7%), κατά βάρος παραγόμενων αποβλήτων (Maragkaki et al, 2022). Στις περισσότερες χώρες τα οργανικά απόβλητα ή βιοαπόβλητα, αντιπροσωπεύουν το κύριο κλάσμα των ΑΣΑ, στην Ελλάδα αντιστοιχούν στο 35% w.w. Η διαχείριση αστικών βιοαποβλήτων είναι μια πρακτική που προωθείται γενικά και έχει υιοθετηθεί από πολλές χώρες. Χαρακτηριστικά, η Ιταλία είναι μια χώρα της Ε.Ε που πρωτοστατεί στη χωριστή συλλογή βιοαποβλήτων και συγκαταλέγεται σε αυτές με το μεγαλύτερο ποσοστό κομποστοποίησης αστικών βιοαποβλήτων (6,5 εκατομμύρια τόνους βιοαπόβλητα). (Bruni et al, 2020).

Δρόλια Ειρήνη: 'Αξιοποίηση αστικών υγρών αποβλήτων και αστικών στερεών βιοαποβλήτων για άρδευση και λίπανση καλλιεργειών'

4.1 Αξιοποίηση βιοαποβλήτων ως εδαφοβελτιωτικό – compost.

Η κομποστοποίηση επιτρέπει την ανακύκλωση των βιοαποβλήτων, μειώνει τον όγκο των απορριμμάτων που οδηγούνται σε ΧΥΤΑ και το παραγόμενο προϊόν (compost ή χούμος), μπορεί να αξιοποιηθεί για την αύξηση της γονιμότητας του εδάφους ή ακόμη και να περιορίσει την ανάγκη για χημική λίπανση. Γενικά, το compost βρίσκεται εφαρμογή στην γεωργία, σε καλλιεργούμενες εκτάσεις, στην κηπουρική ή σαν πρόσθετο σε άλλα οργανικά λιπάσματα. Είναι ένα προϊόν πλούσιο σε άνθρακα, φυτικές ίνες και οργανικά όπως άζωτο και φώσφορο (Πίνακας 14).

Πίνακας 14: Σύνθεση compost από βιοαπόβλητα (Πηγή: Lanno et al, 2022).

Τύπος βιοαποβλήτων	N %	C %	C/N %	P μg/g	K μg/g	Ca μg/g	Mg μg/g	pH
Πράσινα απόβλητα αστικών περιοχών	3.8± 0.1	63.2±0.3	16.63	796±12	4164±30	1224±12	145±5	7.80
Βιοαπόβλητα κουζίνας	8.6± 0.1	61.9±0.3	7.20	120 ± 8	6412±35	947 ± 10	58 ± 5	6.85

Το compost χρησιμοποιείται συχνά ως βιοδιεγερτικό για την βελτίωση της ανάπτυξης των φυτών, την αύξηση πρόσληψης θρεπτικών ουσιών, της απόδοσης της καλλιέργειας ή την ενίσχυση αντοχής των φυτών σε στρεσογόνους περιβαλλοντικούς παράγοντες. Έχει παρατηρηθεί ότι εφαρμογή compost μπορεί να αυξήσει την πλευρική επιμήκυνση της ρίζας, με μηχανισμό παρόμοιο με αυτό της δράσης της αυξίνης (Fascella et al, 2021). Επιπρόσθετα, υψηλότερη απορρόφηση μικροθρεπτικών συστατικών, μετά από εφαρμογή compost, αποδίδεται στην αύξηση της διαπερατότητας της πλασματικής μεμβράνης των ριζών

Γενικά, η προσθήκη compost μπορεί να επηρεάσει σημαντικά πολυάριθμες φυσιολογικές λειτουργίες των φυτών όπως αύξηση της ικανότητας ανταλλαγής ιόντων, ικανότητα συγκράτησης νερού, βιοσύνθεση χλωροφύλλης και νουκλεϊνικών οξέων. Η επίδραση σε όλες αυτές τις λειτουργίες έχει θετική επίδραση στην ανάπτυξη

Διπλωματική Εργασία

Δρόλια Ειρήνη: 'Αξιοποίηση αστικών υγρών αποβλήτων και αστικών στερεών βιοαποβλήτων για άρδευση και λίπανση καλλιεργειών'

των φυτών και στην βελτίωση ποσοτικών και ποιοτικών χαρακτηριστικών τους (Πίνακας 15) (Fascella et al, 2021).

Πίνακας 15: Επίδραση κομπόστ, από αναερόβια χώνευση αστικών βιοαποβλήτων, στο ύψος και τον αριθμό των ανθέων του Orange Jasmine (Fascella et al, 2021).

Επέμβαση	Ύψος φυτού cm	Αριθμός ανθέων ανά φυτό
Μάρτυρας	31.3 b	34.5b
Compost	50.5 a	74.4a

Διαφορετικά γράμματα σε κάθε στήλη υποδεικνύουν σημαντικές διαφορές

Η χωριστή συλλογή οργανικών αποβλήτων έχει φανεί ότι είναι καθοριστική για την παραγωγή compost υψηλής ποιότητας. Η ποιότητα του παραγόμενου υλικού καθορίζεται σημαντικά από την σύνθεση του ανακυκλώσιμου υλικού, αλλά και από τη μέθοδο κομποστοποίησης που εφαρμόζεται και τις παραμέτρους ελέγχου της διεργασίας. Αναμφισβήτητα, η δημόσια αποδοχή και η ενθάρρυνση των πολιτών είναι οι βασικοί παράγοντες για την επιτυχημένη υλοποίηση αξιοποίησης βιοαποβλήτων.

Η κομποστοποίηση μπορεί να διακριθεί σε αερόβια και αναερόβια. Γενικά, συνιστάται διότι είναι φιλική προς το περιβάλλον, οικονομική και μετατρέπει τα απόβλητα σε προϊόντα προστιθέμενης αξίας. Στην αερόβια διεργασία λαμβάνει χώρα βιολογική αποδόμηση, με τη βοήθεια μικροοργανισμών, της οργανικής ύλης προς ένα σταθερό προϊόν, το compost. Οι μικροοργανισμοί που συμμετέχουν είναι βακτηρίδια, ακτινομύκητες, πρωτόζωα. Η διεργασία εξαρτάται από μια σειρά παραμέτρων όπως η υγρασία, το οξυγόνο, η θερμοκρασία και το pH. Οι παράμετροι αυτοί καθορίζουν τη ζωή και την ανάπτυξη των μικροοργανισμών, ιδιαίτερη σημασία έχει η αναλογία άνθρακα-αζώτου. Ιδανικές συνθήκες κομποστοποίησης θεωρούνται όταν η αναλογία C/N κυμαίνεται από 30-35, η υγρασία είναι περίπου στο 55% και ένα pH 6-9 υποστηρίζει μια καλή δραστηριότητα μικροοργανισμών. Παράλληλα, το μέγεθος των σωματιδίων, η κατανομή και το πορώδες επηρεάζουν την απόδοση της διεργασίας.

Διπλωματική Εργασία

Δρόλια Ειρήνη: 'Αξιοποίηση αστικών υγρών αποβλήτων και αστικών στερεών βιοαποβλήτων για άρδευση και λίπανση καλλιεργειών'

Η κομποστοποίηση (αερόβια χώνευση) διενεργείται σε κλειστά ή ανοιχτά συστήματα. Τα ανοιχτά συστήματα διακρίνονται σε δυναμικά, όπως το σύστημα σειραδίων και στατικά, όπως ο στατικός σωρός, κλίνη. Το σύστημα των σειραδίων είναι το πιο διαδεδομένο, όπου το οργανικό υλικό τοποθετείται σε σειράδια και κατά διαστήματα αναδεύεται, κατά κύριο λόγο με κάποιο κατάλληλο μηχανικό εξοπλισμό. Η γεωμετρία των σωρών καθορίζεται από την σύνθεση του οργανικού υλικού και τον τρόπο ανάδευσης. Τα στατικά συστήματα είναι οι σωροί ή τα containers κομποστοποίησης. Τα κλειστά συστήματα διακρίνονται ανάλογα με την ροή του οργανικού υλικού σε οριζόντια ή κάθετα.

Η αναερόβια χώνευση, όπου η οργανική ύλη διασπάται από τη δράση ειδικών βακτηριδίων, χρησιμοποιείται για παράλληλη παραγωγή ενέργειας (βιοαερίου) και compost (εδαφοβελτιωτικού). Η συγκεκριμένη διεργασία συγκεντρώνει κάποια πλεονεκτήματα συγκριτικά με την αερόβια χώνευση, όπως ότι απαιτεί μικρότερη επιφάνεια, δεν δημιουργούνται οσμές, είναι ιδιαίτερα ελκυστική για τη διαχείριση οργανικών αποβλήτων που σαπίζουν, πχ κρέατα, αποφεύγεται η έκθεση σε παράσιτα και πουλιά, καθώς και ότι επιπλέον του εδαφοβελτιωτικού παράγεται και ενέργεια (βιοαέριο), που μπορεί να έχει αρκετές εναλλακτικές δυνατότητες χρήσης.

Η εφαρμογή λοιπόν διεργασιών αξιοποίησης βιοαποβλήτων, μειώνει το κόστος υγειονομικής ταφής, το κόστος συλλογής στερεών αστικών αποβλήτων, ενώ παράγεται υλικό προστιθέμενης αξίας που μπορεί να αξιοποιηθεί στη γεωργία. Το σημαντικότερο, ωστόσο, είναι το περιβαλλοντικό κέρδος, καθώς σημαντικές ποσότητες βιοαποβλήτων εκτρέπονται από την διάθεση σε ΧΥΤΑ. Συνεπώς, η χρήση αστικών βιοαποβλήτων ως πρώτης ύλης για παραγωγή compost, που μπορεί να μειώσει τη χρήση συνθετικών λιπασμάτων ή κατά περίπτωση και να τα αντικαταστήσει, είναι μια ενδιαφέρουσα προοπτική οικονομικά και περιβαλλοντικά.

Διπλωματική Εργασία

Δρόλια Ειρήνη: 'Αξιοποίηση αστικών υγρών αποβλήτων και αστικών στερεών βιοαποβλήτων για άρδευση και λίπανση καλλιεργειών'

4.2 Αξιοποίηση βιοαποβλήτων ως Biochar.

Μεγάλο ενδιαφέρον συγκεντρώνει παγκοσμίως και η παραγωγή βιοεξανθρακωμάτων–biochar (Εικόνα 1) από βιοαπόβλητα. Η χρήση βιοεξανθρακωμάτων στοχεύει στην ενίσχυση της ανάπτυξης των φυτών, στην αύξηση της απόδοσής τους και στην βελτίωση του καλλιεργούμενου εδάφους. Αποτελέσματα μελετών σε καλλιέργειες ρυζιού, σιταριού, αμπέλου έδειξαν αύξηση της παραγωγικότητας των καλλιεργειών μετά την εφαρμογή biochar (Zabaniotou et al, 2020). Συγκεκριμένα, βιοεξανθρακώματα από απόβλητα ενεργού ιλύος, όπως φαίνεται στον Πίνακα 16, έδειξαν αύξηση της απόδοσης σε καλλιέργεια φασολιού και αγγουριού (Zabaniotou et al, 2020).

Η πιο διαδεδομένη διεργασία για παραγωγή biochar είναι η πυρόλυση. Φαίνεται να είναι η πιο αποδοτική και η πιο φιλική στο περιβάλλον, καθώς έχει χαμηλές εκπομπές SO_x και NO_x, συγκριτικά με την καύση και την αεριοποίηση. Επιπλέον, η διεργασία της πυρόλυσης εμφανίζει ευελιξία στο χειρισμό διαφόρων τύπων πρώτων υλών (αποβλήτων), υπό διάφορες συνθήκες λειτουργίας και παράλληλα καταστρέφει μικροοργανισμούς και οργανικά μόρια. Η θερμοκρασία στην οποία λαμβάνει χώρα η πυρόλυση, ο ρυθμός θέρμανσης, η πίεση, ο χρόνος παραμονής και η σύνθεση των απορριμμάτων, επιδρούν σημαντικά στις ιδιότητες των βιοεξανθρακωμάτων (Πίνακας 17). Έτσι, αύξηση του χρόνου παραμονής, αυξάνει την επιφάνεια του biochar, ενώ η αύξηση της θερμοκρασίας συνδέεται με αύξηση της ικανότητας ανταλλαγής ιόντων. Η σύνθεση της πρώτης ύλης καθορίζει την περιεκτικότητα σε θρεπτικά και την δυνατότητα ασφαλούς διάθεσης σε εδάφη. Επομένως, αξιολόγηση και ανάλυση της πρώτης ύλης είναι απαραίτητη για την χρήση βιοεξανθρακωμάτων σε καλλιεργούμενα φυτά, ώστε να αποτραπούν κίνδυνοι για τον άνθρωπο και το περιβάλλον.

Οι κύριες φυσικές ιδιότητες των biochar είναι το μέγεθος των πόρων (πορώδες), ο όγκος, η πυκνότητα, η επιφάνεια - στην οποία λαμβάνουν χώρα οι διάφορες φυσικοχημικές διεργασίες, η υδατοϊκανότητα. Οι χημικές ιδιότητες αφορούν το pH,

Διπλωματική Εργασία

Δρόλια Ειρήνη: 'Αξιοποίηση αστικών υγρών αποβλήτων και αστικών στερεών βιοαποβλήτων για άρδευση και λίπανση καλλιεργειών'

την περιεκτικότητα σε τέφρα, την ηλεκτρική αγωγιμότητα, την ικανότητα ανταλλαγής ιόντων, τη σύνθεση σε άζωτο, άνθρακα, υδρογόνο, οξυγόνο, την περιεκτικότητα σε μέταλλα. Χαρακτηριστικά, ακραίες τιμές pH καθιστούν τα βιοεξανθρακώματα ακατάλληλα για γεωργική εφαρμογή. Οι ιδιότητές τους είναι ζωτικής σημασίας, ώστε να εκτιμηθεί η δυνατότητα ασφαλούς εφαρμογής στο έδαφος (Zabaniotou et al, 2020).

Πίνακας 16: Επίδραση βιοεξανθρακωμάτων στην απόδοση καλλιέργειας (Zabaniotou et al, 2020).

Δόση εφαρμογής t/ha	Καλλιέργεια	Αύξηση Απόδοσης wt%
6	Φασόλι	143,34
9		180,78
12		164,50
25	Αγγούρι	23,28
50		43,69
100		61,32



Εικόνα 1: Biochar

Δρόλια Ειρήνη: 'Αξιοποίηση αστικών υγρών αποβλήτων και αστικών στερεών βιοαποβλήτων για άρδευση και λίπανση καλλιιεργειών'

Πίνακας17: Φυσικοχημικά χαρακτηριστικά βιοξάνθρακωμάτων από πυρόλυση βιοαποβλήτων.

Τύπος αποβλήτων	Θερμοκρασία °C	C wt %	H wt %	N wt %	O wt %	pH	CEC kmole/kg	SSA m ² /g
Ενεργός ιλύς ¹	200	17,09		10,01	2,09	6,54	2,19	
	300	19,72		5,76	1,79	7,20	2,59	
	500	15,26		3,28	0,73	8,70	1,73	
	700	11,33		1,90	0,31	11,15	0,71	
Βιοστερεά ^{2,3}	600	21,8	1,10	3,20	7,90			92,30
Απόβλητα τροφών ³	600	50,41	1,26	1,86	9,44			359,52

1: Zabaniotou et al, 2020

2: Βιοστερεά: περιλαμβάνουν στερεά που αφαιρούνται κατά τις διεργασίες επεξεργασίας υγρών αποβλήτων

3: Novotný et, 2023

CEC: Ικανότητα ανταλλαγής ιόντων

SSA: Ειδική επιφάνεια

Δρόλια Ειρήνη: 'Αξιοποίηση αστικών υγρών αποβλήτων και αστικών στερεών βιοαποβλήτων για άρδευση και λίπανση καλλιεργειών'

Το ενδιαφέρον των ερευνητών τα τελευταία χρόνια έχει προκαλέσει η χρήση των βιοεξανθρακωμάτων για ακινητοποίηση τοξικών μετάλλων. Οι περισσότερες μελέτες αφορούν το κάδμιο (Cd), καθώς είναι εξαιρετικά τοξικό και καρκινογόνο ακόμη και σε χαμηλές συγκεντρώσεις. Ορυκτά συστατικά, όπως Si, Al, Fe, και Ca που απαντώνται στα biochar φαίνεται να συμμετέχουν σε μεγάλο βαθμό στην απομάκρυνση βαρέων μετάλλων μέσω ανταλλαγής κατιόντων, συμπλοκοποίησης και κατακρήμνισης (Wu et al, 2023).

Σημαντικό είναι ακόμα ότι η προσθήκη biochar στα εδάφη ενισχύει την αντοχή των φυτών στην αλατότητα, καθώς βελτιώνει τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά του εδάφους (πορώδες, ικανότητα συγκράτησης νερού, pH, ικανότητα ανταλλαγής ιόντων, θρεπτικά συστατικά, βιοδιαθεσιμότητα Na, μικροβιακή και ενζυματική δραστηριότητα). Επιπρόσθετα, μελέτες τελευταίων ετών έχουν αναδείξει ότι η εφαρμογή biochar στο έδαφος, με την βελτίωση της υδατοικανότητας, οδήγησε σε ενισχυμένη στοματική αγωγιμότητα, φωτοσυνθετικό ρυθμό και παραγωγικότητα, υπό συνθήκες ξηρασίας (Wu et al, 2023).

Αξίζει να σημειωθεί ότι τα βιοεξανθρακώματα έχουν αποδειχθεί μια καλή επιλογή ως προσθετικού στην κομποστοποίηση. Το πορώδες τους ενισχύει τον ρυθμό αερισμού και παρέχει ενδιαίτημα για την ανάπτυξη και την ενίσχυση της δραστηριότητας των μικροοργανισμών. Αποτέλεσμα είναι η αύξηση της απόδοσης της κομποστοποίησης, η μείωση έκλυσης οσμών και η ελαχιστοποίηση εκπομπής αερίων του θερμοκηπίου. Ωστόσο, δεν παύει το κόστος των biochar να αποτελεί έναν περιοριστικό παράγοντα για την χρήση αυτή (Wu et al, 2023).

Παράλληλα, ενδιαφέρον αντλεί και η χρήση των βιοεξανθρακωμάτων, ως ετερογενών καταλυτών για παραγωγή βιοκαυσίμων (Elhalifa et al, 2022). Τέλος τα πολυλειτουργικά χαρακτηριστικά τους, καταδεικνύουν μια πολύ αποτελεσματική δυνατότητα στον τομέα της αποκατάστασης του υδάτινου περιβάλλοντος. Πρόσφατες μελέτες έδειξαν ότι τα βιοεξανθρακώματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως προσροφητικά για την απομάκρυνση ρύπων από το νερό. Οι μηχανισμοί

Διπλωματική Εργασία

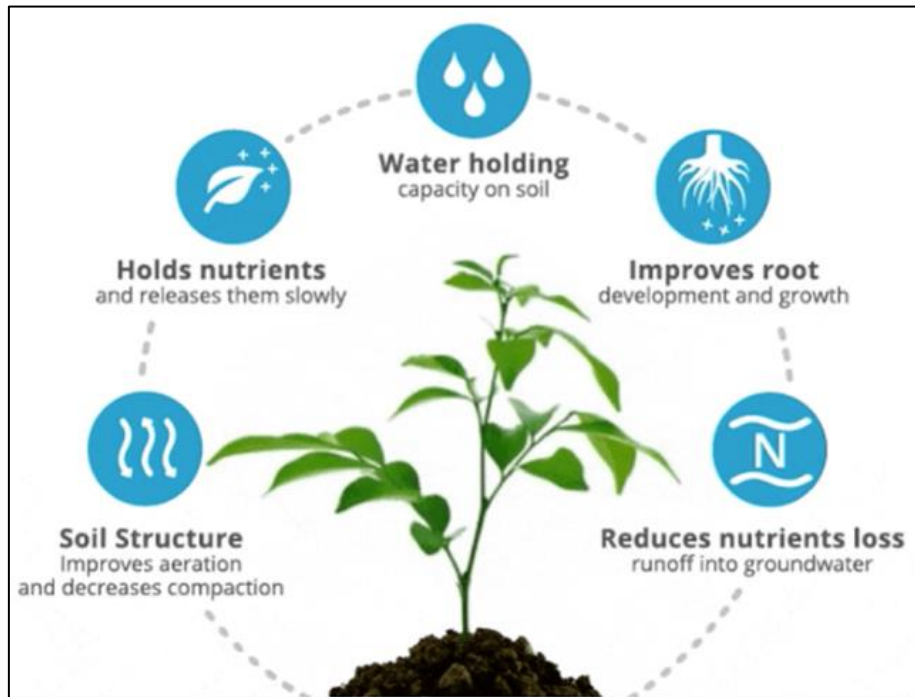
Δρόλια Ειρήνη: 'Αξιοποίηση αστικών υγρών αποβλήτων και αστικών στερεών βιοαποβλήτων για άρδευση και λίπανση καλλιεργειών'

προσρόφησης περιλαμβάνουν κυρίως υδροφοβική αλληλεπίδραση, πλήρωση πόρων, ηλεκτροστατική προσρόφηση και δεσμούς υδρογόνου (Zhao et al, 2023).

Συνοψίζοντας, τα σημαντικότερα οφέλη που καταγράφονται από την εφαρμογή βιοεξανθρακωμάτων είναι (Εικόνα 2).

- Η βελτίωση συγκράτησης νερού, με αποτέλεσμα μείωση των αναγκών άρδευσης.
- Η βελτίωση απορρόφησης θρεπτικών συστατικών.
- Η αύξηση της ικανότητας ανταλλαγής ιόντων, με συνέπεια την βελτίωση της γονιμότητας του εδάφους.
- Η μείωση της βιοδιαθεσιμότητας οργανικών ρύπων και φυτοφαρμάκων.
- Η βελτίωση της δομής του εδάφους (αερισμός, πορώδες).
- Η αύξηση του pH.
- Η μείωση τοξικότητας, μέσω της μείωσης βιοδιαθεσιμότητας βαρέων μετάλλων.
- Η αύξηση της αποτελεσματικότητας άλλων λιπασμάτων.
- Η αύξηση της δραστηριότητας ωφέλιμων μικροοργανισμών, παρέχοντας τους πόρους τους ως ενδιαίτημα.

Δρόλια Ειρήνη: 'Αξιοποίηση αστικών υγρών αποβλήτων και αστικών στερεών βιοαποβλήτων για άρδευση και λίπανση καλλιεργειών'



Εικόνα 2: Οφέλη αξιοποίησης βιοεξανθρακωμάτων στη γεωργία.

Προκειμένου να είναι δυνατή η είσοδος των βιοεξανθρακωμάτων στην αγορά, απαιτείται μια διαδικασία τυποποίησης. Στην παρούσα φάση υπάρχουν δυο συστήματα τυποποίησης το IBI (International Biochar Initiative) και το EBC (European Biochar Certificate). Στόχος των συστημάτων αυτών είναι να προσδιορίζουν τα βιοεξανθρακώματα που είναι κατάλληλα και ασφαλή για εφαρμογή στο έδαφος.

Η αξιοποίηση, λοιπόν, biochar στη γεωργία δικαιολογημένα συγκεντρώνει το ενδιαφέρον, καθώς πρόκειται για ένα προϊόν που μπορεί να αυξήσει την απόδοση των καλλιεργειών, να βελτιώσει τη γονιμότητα του καλλιεργούμενου εδάφους, να μειώσει την ανάγκη για χρήση συνθετικών λιπασμάτων ενώ παράλληλα συμβάλει στον περιορισμό εκπομπής αερίων του θερμοκηπίου, αφού σημαντικός όγκος βιοαποβλήτων δεν οδηγείται σε ΧΥΤΑ ή σε διαδικασία καύσης.

Διπλωματική Εργασία

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ –ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ

Σε μια εποχή που αντιμετωπίζουμε όλο και συχνότερα τις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής, όπως φαινόμενα έντονης ξηρασίας, σε μια εποχή υπερκατανάλωσης αγαθών και ενέργειας, που οδηγεί ολοταχώς στην εξάντληση φυσικών πόρων, ο τομέας της διαχείρισης των αποβλήτων θα μπορούσε να προταθεί ως μια 'σανίδα σωτηρίας'. Σε πρώτη ανάγνωση θα μπορούσε κάποιος να το θεωρήσει παράδοξο ή υπερβολή, ωστόσο η σωστή διαχείριση των αποβλήτων που τόσο εύκολα και σε γιγάντιες ποσότητες παράγονται καθημερινά ανά την υφήλιο, μπορεί να αποδώσει ενέργεια, καθαρό νερό, να ανακτήσει πρώτες ύλες ή να παράγει δευτερογενείς πρώτες ύλες.

Ειδικά, στον τομέα της γεωργίας η ορθή διαχείριση των αποβλήτων μπορεί να αποτελέσει έναν σημαντικό σύμμαχο. Τα επεξεργασμένα υγρά απόβλητα μπορούν να αξιοποιηθούν για άρδευση καλλιεργειών και να δώσουν λύση σε περιπτώσεις έντονης λειψυδρίας, που δεν είναι δυνατή η κάλυψη των αναγκών των φυτών σε νερό.

Επιπλέον, η άρδευση με επεξεργασμένα υγρά απόβλητα, σε κάποιες περιπτώσεις μπορεί να προσφέρει και σημαντικές ποσότητες θρεπτικών συστατικών. Η χημική ανάλυση της σύστασης των αποβλήτων σε συνδυασμό με τις θρεπτικές απαιτήσεις της κάθε καλλιέργειας, θα προσδιορίσει αν θα χρειασθεί επιπρόσθετη λίπανση ή όχι. Ακόμη, όταν τα υγρά απόβλητα περιέχουν σημαντικές ποσότητες αζώτου ή φωσφόρου, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για απομάκρυνση αυτών των θρεπτικών και την αξιοποίησή τους από λιπασματοβιομηχανίες.

Στον ελλαδικό χώρο η αξιοποίηση των αποβλήτων στον τομέα της γεωργίας δεν είναι ιδιαίτερα ανεπτυγμένη. Υπάρχουν αρκετές περιπτώσεις (Πίνακας 1), όπου τα επεξεργασμένα υγρά απόβλητα του βιολογικού καθαρισμού Δήμων διοχετεύονται στην άρδευση καλλιεργειών, αλλά συνήθως σε περιορισμένες ποσότητες και σε λίγες καλλιέργειες. Το γεγονός αυτό εξηγείται από το ότι υπάρχει ακόμα δυσπιστία ως προς την ασφάλεια του επεξεργασμένου νερού για την καλλιέργεια και την υγεία του ανθρώπου, καθώς και το ότι απαιτείται κάποιο κόστος για τις υποδομές σύνδεσης του βιολογικού με τις καλλιεργούμενες εκτάσεις.

Διπλωματική Εργασία

Δρόλια Ειρήνη: 'Αξιοποίηση αστικών υγρών αποβλήτων και αστικών στερεών βιοαποβλήτων για άρδευση και λίπανση καλλιεργειών'

Ωστόσο, καθώς οι κλιματικές συνθήκες των τελευταίων ετών επιτείνουν φαινόμενα ξηρασίας και λειψυδρίας, ιδιαίτερα στην Περιφέρεια της Νότιας Ελλάδος, η εκμετάλλευση του νερού των βιολογικών καθαρισμών φαίνεται να είναι η πιο κατάλληλη επιλογή, η πιο άμεση και ίσως η πιο οικονομική. Μεγαλύτερα έργα υποδομής όπως φράγματα, απαιτούν περισσότερο χρόνο για την υλοποίησή τους γιατί χρειάζονται μελέτες, αδειοδοτήσεις και παράλληλα και ένα υψηλό κόστος κατασκευής.

Προκειμένου να επιτευχθεί η ασφαλή διάθεση του επεξεργασμένου νερού στις καλλιέργειες, πρέπει πρωταρχικά να βρεθούν οι πόροι ώστε να υλοποιηθούν τα έργα υποδομής. Ταυτόχρονα, πρέπει να πραγματοποιούνται συχνά αναλύσεις της σύστασης των επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων και σε συνδυασμό με τις θρεπτικές απαιτήσεις και τις ευαισθησίες της κάθε καλλιέργειας, να προσδιορίζονται οι τροποποιήσεις που πρέπει να γίνονται στο νερό ή τα μέτρα που πρέπει να λαμβάνονται στην καλλιέργεια.

Άλλα απόβλητα που μπορούν να βρουν εφαρμογή στη γεωργία είναι τα βιοαπόβλητα. Με την ορθή επεξεργασία τους τα βιοαπόβλητα παράγουν δευτερογενείς πρώτες ύλες όπως compost ή biochar, που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως εδαφοβελτιωτικά και να συμβάλλουν στη βελτίωση της δομής του καλλιεργούμενου εδάφους, στην βελτίωση των χαρακτηριστικών και της απόδοσης των καλλιεργειών. Ωστόσο, η αξιοποίηση των βιοαποβλήτων στην Ελλάδα βρίσκεται στα σπάργανα. Δυστυχώς, λίγοι είναι οι Δήμοι που έχουν εγκαταστήσει κάδους για την συλλογή αστικών βιοαποβλήτων. Υπάρχουν κάποιοι Δήμοι που έχουν υλοποιήσει μελέτες και έχουν εγκρίνει την δημιουργία μονάδων επεξεργασίας βιοαποβλήτων, ωστόσο δεν έχουν ολοκληρωθεί τα έργα ή δεν λειτουργούν ακόμα οι μονάδες.

Είναι σημαντικό, λοιπόν, οι Δήμοι να αναλάβουν την πρωτοβουλία, ώστε να μπορέσουν να αξιοποιήσουν αποτελεσματικά τον μεγάλο όγκο των βιοαποβλήτων και συνάμα να τον αποτρέψουν από την διάθεση σε ΧΥΤΑ. Πρέπει να γίνει κάθε δυνατή

Διπλωματική Εργασία

Δρόλια Ειρήνη: 'Αξιοποίηση αστικών υγρών αποβλήτων και αστικών στερεών βιοαποβλήτων για άρδευση και λίπανση καλλιεργειών'

προσπάθεια για την εξασφάλιση πόρων (Ευρωπαϊκά προγράμματα, πράσινο ταμείο), προκειμένου να είναι εφικτή η ορθή διαχείριση των βιοαποβλήτων, συλλογή-μεταφορά-επεξεργασία. Παράλληλα, πρέπει να λάβουν χώρα προγράμματα ενημέρωσης και ευαισθητοποίησης των πολιτών, διότι η επιτυχής αξιοποίηση των αστικών βιοαποβλήτων βρίσκεται στα χέρια τους.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Aydin, S., Ulvi, A., Beduk, F., Aydin, M. E. (2022). Pharmaceutical residues in digested sewage sludge: Occurrence, seasonal variation and risk assessment for soil. *Science of the total Environment*, 817, 152864.

Bakari, Z., Ghadraoui, A., Boujelben, N., Bubba, M. D., Elleuch, B. (2022) Assessment of the impact of irrigation with treated wastewater at different dilutions on growth, quality parameters and contamination transfer in strawberry fruits and soil: Health risk assessment. *Scientia Horticulturae*, 297,110942.

Bruni, C., Akyol, Ç., Cipolletta, G., Eusebi, A. L., Caniani, D., Masi, S. & Fatone, F. (2020). Decentralized community composting: past, present and future aspects of Italy. *Sustainability*, 12(8), 3319.

Chojnacka, K., Witek-Krowiak, A., Moustakas, K., Skrzypczak, D., Mikula, K., & Loizidou, M. (2020). A transition from conventional irrigation to fertigation with reclaimed wastewater: Prospects and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 130, 109959.

De Vries, W., Römkens, P.F.A.M., Kros, J., Voogd, J.C, and Schulte-Uebbing, L.F. (2022). *Impacts of nutrients and heavy metals in European agriculture. Current and critical inputs in relation to air, soil and water quality*, ETC-DI.

Diaz. V., Leyva-Diaz, J. C., Almecija, M. C., Poyatos, J. M., Munio, M., Martin – Pascual, J. (2022). Microalgae bioreactor for nutrient removal and resource recovery from wastewater in the paradigm of circular economy. *Bioresource Technology*, 363, 127968.

Elkhalifa, S., Mackey, H., Al-Ansari, T and McKay, G. (2022). Pyrolysis of Biosolids to Produce Biochars: A Review. *Sustainability* 14, 9626.

Δρόλια Ειρήνη: 'Αξιοποίηση αστικών υγρών αποβλήτων και αστικών στερεών βιοαποβλήτων για άρδευση και λίπανση καλλιεργειών'

Elif, Y., Akif, A., Ahmet, A., 2021. Land application of municipal sewage sludge: Human health risk assessment of heavy metals. *Journal of Cleaner Production* 319, 128568.

European Environment Agency (2020). Biowaste in Europe- turning challenges in opportunities.

Fascella, G., Montoneri, E., & Roupael, Y. (2021). Biowaste-derived humic-like substances improve growth and quality of Orange Jasmine (*Murraya paniculata* L. Jacq.) plants in soilless potted culture. *Resources*, 10(8), 80.

Gowd, S. C., Kumar, D., Lin, R., Rajendran, K. (2022). Nutrient recovery from wastewater in India: A perspective from mass and energy balance for a sustainable circular economy. *Bioresource Technology Reports*, 18, 101079.

Hassena, A.B., Zouari, M., Labrousse, P., Decou, R., Soua. N., Khabou. W., Zouari. N. (2022). Effect of arbuscular mycorrhizal fungi on soil properties, mineral nutrition and antioxidant enzymes of olive plants under treated wastewater irrigation. *South African Journal of Botany* 148 ,710-719.

Hoekstra, A.Y., Chapagain, A., Martinez-Aldaya, M., Mekonnen, M., 2009. Water Footprint Manual: State of the Art 2009.

Lanno , M., Klavins , M., Purmalis, O., Shanskiy, M., Kisand, A. and Kriipsalu, M. (2022). Properties of Humic Substances in Composts Comprised of Different Organic Source Material. *Agriculture* 12, 1797.

Maragkaki, A., Gamvroudis, C., Lountou, C., Stamatiadis, P., Ioannis Sampathianakis, I., Papadaki, A and Manios, T (2022). Autonomous Home Composting Units for Urban areas in Greece: The Case Study of the Municipality of Rhodes. *Sustainability* 14, 12362.

Marcinczyk, M., Ok, Y. S., Oleszczuk, P. (2022). From waste to fertilizer: Nutrient recovery from wastewater by pristine and engineered biochars. *Chemosphere*, 306, 135310.

Διπλωματική Εργασία

Δρόλια Ειρήνη: 'Αξιοποίηση αστικών υγρών αποβλήτων και αστικών στερεών βιοαποβλήτων για άρδευση και λίπανση καλλιεργειών'

Novotný, M., Marković, M., Raček, J., Šipka, M., Chorazy, T., Tošić, I., Hlavínek, P. (2023). The use of biochar made from biomass and biosolids as a substrate for green infrastructure: A review. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 32, 100999.

Sabbahi, S., Ayed, L. B., Trad, M., Berndtsson, R., Karanis, P. (2022). Parasitological Assessment of Sewage Sludge Samples for Potential Agricultural Reuse in Tunisia. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19, 1657.

Silva, R d S., Jalal, A., Nascimento, R., Elias, N. C., Kawakami, K. C., Abreu-Junior, C. H., Oliveira, F. C., Jani, A. D., He, Z., Zhao, F., Minhoto, M. C., Rossetto, R., Capra, G. F., Nogueira, T. A. R. (2022). Composted Sewage Sludge Application Reduces Mineral Fertilization Requirements and Improves Soil Fertility in Sugarcane Seedling Nurseries. *Sustainability* 14, 4684.

Szostek, M., Kosowski, P., Szpunar-Krok, E., Matlok, N., Skrobacz, K., Pieniazek, R., Balawejder, M. (2022). The Usefulness of Ozone-Stabilized Municipal Sewage Sludge for Fertilization of Maize (*Zea mays* L.). *Agriculture*, 12, 387.

Wu, P., Singh, B., Wang, H., Jia, Z., Wang, Y. and Chen, W. (2023) Bibliometric analysis of biochar research in 2021: a critical review for development, hotspots and trend directions. *Biochar* 5:6.

Zabaniotou, A., & Stamou, K. (2020). Balancing waste and nutrient flows between urban agglomerations and rural ecosystems: biochar for improving crop growth and urban air quality in the Mediterranean region. *Atmosphere*, 11(5), 539.

Zhang, H., Qi, H., Zhang, Y., Ran, D., Wu, L., Wang, H., Zeng, R. J.(2022). Effects of sewage sludge pretreatment methods on its use in agricultural applications. *Journal of Hazardous Materials*, 428, 128213.

Zhao, L., Sun, Z., Dan, X., Tan, J., Yang, S., Wu, J., Chen, C., Yuan, Y., Ren, N. (2023). Sewage sludge derived biochar for environmental improvement: Advances, Challenges and Solutions. *Water Research* 18, 100167.

<https://ec.europa.eu/environment/water/reuse.htm>

<http://wasteatlas.diktiofodsa.gr/>

Διπλωματική Εργασία

Δρόγια Ειρήνη: 'Αξιοποίηση αστικών υγρών αποβλήτων και αστικών στερεών βιοαποβλήτων για άρδευση και λίπανση καλλιεργειών'

<http://astikalimata.ypeka.gr/Services/Pages/WtpViewApp.aspx>

<https://ec.europa.eu/eurostat>

www.ypen.gr

Κανονισμός 2020/741 ΕΕ

ΚΥΑ 80568/4225/1991

ΚΥΑ 145116/2011

Οδηγία 91/271/ΕΟΚ

Δρόλια Ειρήνη: 'Αξιοποίηση αστικών υγρών αποβλήτων και αστικών στερεών βιοαποβλήτων για άρδευση και λίπανση καλλιιεργειών'

Υπεύθυνη Δήλωση Συγγραφέα:

Δηλώνω ρητά ότι, σύμφωνα με το άρθρο 8 του Ν.1599/1986, η παρούσα εργασία αποτελεί αποκλειστικά προϊόν προσωπικής μου εργασίας, δεν προσβάλλει κάθε μορφής δικαιώματα διανοητικής ιδιοκτησίας, προσωπικότητας και προσωπικών δεδομένων τρίτων, δεν περιέχει έργα/εισφορές τρίτων για τα οποία απαιτείται άδεια των δημιουργών/δικαιούχων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής, οι πηγές δε που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον και πληρούν τους κανόνες της επιστημονικής παράθεσης