



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ-ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

«ΕΠΙΣΤΗΜΗ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ

ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ»

**«ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ
ΚΑΤΑΛΛΗΛΩΝ ΔΕΙΚΤΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ
ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ
ΒΙΟΠΟΙΚΙΛΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥ
ΕΔΑΦΟΥΣ ΣΕ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΕΣ ΟΙ
ΟΠΟΙΕΣ ΑΡΔΕΥΟΝΤΑΙ ΜΕ
ΛΥΜΑΤΑ»**

Μυρτώ Τσίρου

Αθήνα, Μάρτιος 2023

**«ΕΠΙΣΤΗΜΗ &
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΔΑΤΙΚΩΝ
ΠΟΡΩΝ»**

**Επιβλέπων: Συμεών-
Αλέξανδρος Μαλαμής**

Πίνακας περιεχομένων

Περίληψη.....	5
Abstract	7
1 Εισαγωγή.....	8
1.1 Επαναχρησιμοποίηση ανακτημένου νερού.....	9
1.2 Κυκλική Οικονομία.....	12
1.3 Σκοπός και δομή εργασίας.....	14
2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση.....	15
2.1 Χαρακτηριστικά των υγρών αποβλήτων.....	15
2.1.1 Δυσμενείς επιπτώσεις από την επαναχρησιμοποίηση λυμάτων.....	15
2.2 Νομοθετικό πλαίσιο και κριτήρια που διέπουν την επαναχρησιμοποίηση του ανακτημένου νερού.....	19
2.2.1 Ελληνική Νομοθεσία.....	19
2.2.2 Κανονισμός (ΕΕ) 2020/741 του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 25ης Μαΐου 2020.....	24
2.2.3 Κριτήρια του Παγκόσμιου Οργανισμού Υγείας.....	26
2.3 Αξιολόγηση της ποιότητας των υγρών αποβλήτων προς άρδευση.....	33
2.4 Συνέπειες της άρδευσης με υγρά απόβλητα στο έδαφος και τα φυτά.....	35
2.4.1 Αλάτωση του εδάφους.....	35
2.4.2 Διηθητικότητα του εδάφους.....	36
2.4.3 Τοξικότητα ιόντων.....	37
2.4.4 Θρεπτικά στοιχεία.....	42
2.4.5 Διάφορα προβλήματα.....	44
2.5 Ποιότητα εδάφους και εδαφική υγεία.....	45
2.5.1 Λειτουργίες των εδαφικών οικοσυστημάτων και οφέλη για τον άνθρωπο.....	45
2.5.2 Εδαφική υγεία.....	46
2.6 Βιοποικιλότητα.....	48
2.6.1 Ορισμός.....	48
2.6.2 Χαρακτηριστικά βιοποικιλότητας.....	48
2.6.3 Παράγοντες που σχετίζονται με την βιοποικιλότητα.....	49
2.7 Αφθονία οργανισμών.....	50
2.7.1 Παραγομένη βιομάζα και μεταβολική δραστηριότητα.....	50
2.8 Οργανισμοί εδάφους.....	52
2.8.1 Μικροοργανισμοί.....	52
2.8.2 Μέσο και μάκρο πανίδα.....	57
2.8.3 Εδαφική μικροπανίδα: Νηματώδεις & Πρωτόζωα.....	60

2.8.4 Ένζυμα εδάφους.....	61
2.9 Δείκτες ποιότητας εδάφους.....	62
2.9.1 Επιλογή δεικτών.....	64
2.9.2 Ερμηνεία μετρήσεων.....	65
2.10 Επιλογή παραμέτρων εκτίμησης υγείας εδάφους.....	67
2.10.1 Χρήση βιοχημικών παραμέτρων.....	67
2.10.2 Επιλογή βιοχημικών παραμέτρων.....	68
2.10.3 Μικροβιακή βιομάζα.....	69
2.10.4 Δραστηριότητα αφυδρογονάσης.....	70
3 Διερεύνηση Δεικτών Αποτίμησης Βιοποικιλότητας.....	72
3.1 Επίδραση λυμάτων σε μικροοργανισμούς.....	76
3.1.1 Μελέτες με χρήση βιοχημικής μεθόδου και μικροοργανισμούς ως δείκτες.....	80
3.1.2 Μελέτες με χρήση μοριακής μεθόδου και ως δείκτες μικροοργανισμούς.....	81
3.2 Επίδραση λυμάτων σε μεσοπανίδα και μακροπανίδα.....	86
3.2.1 Μελέτες που χρησιμοποιήσαν ως δείκτες μέσο και μάκρο πανίδα.....	88
3.3 Επίδραση λυμάτων στην ενζυμική δραστηριότητα.....	90
3.3.1 Μελέτες που ασχολήθηκαν με ενζυμική δραστηριότητα.....	92
4 Συμπεράσματα.....	95
5 Βιβλιογραφία-Αναφορές.....	97

Περιεχόμενα Πινάκων

Πίνακας 1: Βασικές αρχές ενός συστήματος που έχει υιοθετήσει την Κυκλική οικονομία (Κοντογιάννη,2021).....	13
Πίνακας 2: Τυπική σύσταση ανεπεξέργαστων αστικών υγρών αποβλήτων.....	16
Πίνακας 3: Συστατικά των αστικών υγρών αποβλήτων που πρέπει να παρακολουθούνται.	17
Πίνακας 4 :Σύγκριση απαιτήσεων ποιότητας ανακτημένου νερού απεριόριστης και περιορισμένης άρδευσης Κ.Υ.Α (Πηγή: Κ.Υ.Α. 145116/2011, 2011).....	20
Πίνακας 5: Επιθυμητά αγρονομικά χαρακτηριστικά των προς άρδευση επαναχρησιμοποιούμενων επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων (Πηγή: Κ.Υ.Α. 145116/2011, 2011).....	22
Πίνακας 6: κατηγορίες ποιότητας του ανακτημένου νερού, επιτρεπόμενη γεωργική χρήση και μέθοδος άρδευσης.....	25
Πίνακας 7: Απαιτήσεις ποιότητας ανακτημένου νερού κατηγορίας Α,Β,Γ,Δ του Κανονισμού 2020/741 (Πηγή: Κανονισμός 2020/741, 2020).....	26
Πίνακας 8: Εκτίμηση της ποιότητας των αρδευτικών νερών.....	26
Πίνακας 9: Μικροβιολογικά κριτήρια επαναχρησιμοποίησης των αστικών υγρών αποβλήτων, που συνιστώνται για άρδευση από τον W.H.O. ^α	27

Πίνακας 10: Συνιστώμενες οδηγίες για επαναχρησιμοποίηση νερού στην περιοχή της Μεσογείου.....	28
Πίνακας 11: Κριτήρια ποιοτικής κατάταξης του αρδευτικού νερού	33
Πίνακας 12: Ανθεκτικότητα αγροτικών καλλιεργειών στο βόριο ^α (Maas 1990)	38
Πίνακας 13: Ανθεκτικότητα διαφόρων καλλιεργειών στα χλωριόντα (Maas 1990)	39
Πίνακας 14: Ανθεκτικότητα ορισμένων φυτών σε ζημιές της φυλλικής επιφάνειας κατά την εφαρμογή άρδευσης με καταιονισμό, ανάλογα με τη συγκέντρωση Na ή Cl στο νερό άρδευσης ^α (Maas 1990)	40
Πίνακας 15: Συνιστώμενες μέγιστες συγκεντρώσεις μετάλλων σε νερά που χρησιμοποιούνται το πολύ 20 χρόνια και σε εδάφη λεπτόκοκκης υφής με pH 6.0-8.5 (Σακελλαρίου κ.α., 2003)	41
Πίνακας 16: Ενδεικτικός αριθμός και βιομάζα της πανίδας και χλωρίδας σε επιφανειακούς ορίζοντες του εδάφους (Τζανακάκης,2020)	50
Πίνακας 17: Διαχειρίσεις εδάφους που επηρεάζουν τη βιοποικιλότητα.....	57
Πίνακας 18: Γενική κατάταξη σύμφωνα με το μέγεθος σημαντικών ομάδων οργανισμών του εδάφους	58
Πίνακας 19: Χαρακτηριστικά απορριμμάτων γαιοσκωλήκων	60
Πίνακας 20: Προτεινόμενη ελάχιστη ομάδα δεικτών της ποιότητας του εδάφους (Mausbach & Tugel 1997)	63
Πίνακας 21: Σύνολο εργασιών στις οποίες έγιναν μελέτες για την επίδραση των λυμάτων στην αφθονία και βιοποικιλότητα των μικροοργανισμών του εδάφους.....	76
Πίνακας 22: Εκτίμηση της επίδρασης επεξεργασμένων λυμάτων στην αφθονία μικροοργανισμών με χρήση βιοχημικής μεθόδου	80
Πίνακας 23: Αποτελέσματα μελετών με χρήση μοριακής μεθόδου	81
Πίνακας 24: Σύνολο εργασιών στις οποίες έγιναν μελέτες για την επίδραση των λυμάτων στην αφθονία και βιοποικιλότητα των μέσο και μακρο οργανισμών του εδάφους.....	86
Πίνακας 25: Αποτελέσματα μελετών με χρήση δεικτών μέσο και μακρο πανίδας για την αποτίμηση της επίδρασης των λυμάτων στο έδαφος	88
Πίνακας 26: Σύνολο εργασιών στις οποίες έγιναν μελέτες για την επίδραση των λυμάτων στην ενζυμική δραστηριότητα του εδάφους.....	90
Πίνακας 27: Αποτελέσματα μελετών που αφορούν ενζυμική δραστηριότητα.....	92

Περιεχόμενα Εικόνων

Εικόνα 1: Διάγραμμα Wilcox για την αξιολόγηση της ποιότητας του αρδευτικού νερού (Xu et al., 2019).....	34
Εικόνα 2: Γραφική παράσταση της βασικής ιδέας της εδαφικής ποιότητας (Mausbach and Tugel 1997).....	47
Εικόνα 3: Επίδραση της εδαφικής υγρασίας στη βιολογική δραστηριότητα των μικροοργανισμών (βάθος: 0-20 cm) (Σιδηράς 1992).....	55

Περίληψη

Τα τελευταία χρόνια, εξαιτίας της αύξησης του πληθυσμού, της αστικοποίησης, της κλιματικής αλλαγής και της αλόγιστης χρήσης φυσικών πόρων, η ορθολογική και αειφόρος διαχείριση των υδατικών πόρων έχει μετατραπεί σε θέμα μείζονος κοινωνικής σημασίας. Η σταδιακή μείωση των βροχοπτώσεων σε συνδυασμό με την αύξηση της κατανάλωσης του νερού έχουν οδηγήσει σε φαινόμενα λειψυδρίας και εξάντλησης των υδατικών αποθεμάτων, με δυσμενείς συνέπειες τόσο στον περιβαλλοντικό όσο και στον οικονομικό και κοινωνικό τομέα.

Στο πλαίσιο της βιώσιμης ανάπτυξης βασικό μέλημα αποτελεί η εξεύρεση εναλλακτικών υδατικών πηγών, οι οποίες θα μειώνουν το περιβαλλοντικό κόστος και θα βοηθήσουν στην εξοικονόμηση των πολύτιμων φυσικών πόρων. Έναν τέτοιο εναλλακτικό υδατικό πόρο μπορούν να αποτελέσουν τα αστικά λύματα. Η ανάκτηση και η επαναχρησιμοποίηση επεξεργασμένων αστικών λυμάτων αποτελεί αρκετά συνηθισμένη πρακτική σε πολλές περιοχές του κόσμου. Τα επεξεργασμένα λύματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την άρδευση καλλιεργειών και χώρων αστικού και περι-αστικού πρασίνου, εμπλουτισμού υπόγειου υδροφορέα και για βιομηχανική χρήση.

Στην παρούσα εργασία εξετάζεται η δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης υγρών λυμάτων ως εναλλακτικού υδατικού πόρου για την κάλυψη μέρους των αρδευτικών αναγκών αλλά και την επιρροή που θα φέρει η άρδευση στην υγεία του εδάφους. Πιο αναλυτικά, πραγματοποιείται εκτίμηση της επίδρασης της άρδευσης στην βιοποικιλότητα και αφθονία των οργανισμών και παράλληλα διερευνώνται οι συνιστώσες που καθορίζουν ποιοι είναι οι κατάλληλοι δείκτες αποτίμησης της υγείας του εδάφους.

Στο Κεφάλαιο 2, γίνεται μία εισαγωγή για την επαναχρησιμοποίηση του ανακτημένου νερού, δίνονται παραδείγματα ανά χώρα, αναλύονται τα πλεονεκτήματα της επαναχρησιμοποίησης, οι κατηγορίες χρήσης, ο διαχωρισμός του ανακτημένου νερού ανάλογα με την ποιότητά του και παράλληλα γίνεται άμεση σύνδεση της επαναχρησιμοποίησης με την κυκλική οικονομία. Επίσης, αναλύεται το νομοθετικό πλαίσιο και τα κριτήρια που διέπουν την επαναχρησιμοποίηση του ανακτημένου νερού, τα χαρακτηριστικά των υγρών αποβλήτων και οι συνέπειες που μπορεί να έχουν στο έδαφος η άρδευση με αυτά.

Επιπρόσθετα, εξετάζεται η ποιότητα του εδάφους και ο όρος εδαφική υγεία, ενώ ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στη βιοποικιλότητα και αφθονία των οργανισμών του εδάφους. Πραγματοποιείται πλήρης περιγραφή των οργανισμών αυτών, όπως είναι οι μικροοργανισμοί, η μέσο-μάκρο πανίδα και μικροπανίδα. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται και στα ένζυμα, τα οποία επιτελούν σημαντικό ρόλο, αφού συνδέονται άμεσα με τη λειτουργικότητα των μικροοργανισμών. Επιπροσθέτως, η επιλογή των δεικτών που καταστούν δυνατό τον προσδιορισμό της ποιότητας του εδάφους είναι μεγάλης σημασίας.

Στο Κεφάλαιο 3 πραγματοποιείται κριτική ανασκόπηση των μελετών, των αποτελεσμάτων και των μεθόδων που αφορούν την επίδραση των λυμάτων σε μικροοργανισμούς, οι μελέτες

που χρησιμοποίησαν ως δείκτες μέσο και μάκρο-πανίδα και μελέτες που ασχολήθηκαν με την επίδραση λυμάτων στην ενζυμική δραστηριότητα των μικροοργανισμών.

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την παραπάνω ανάλυση είναι πως οι μικροοργανισμοί είναι οι καταλληλότεροι δείκτες για την αποτίμηση της υγείας του εδάφους, διότι αντιδρούν γρήγορα στις αλλαγές του περιβάλλοντος και δίνουν άμεσα αποτελέσματα. Επιπλέον, από όλους τους ερευνητές που ασχολούνται με εδαφικές μελέτες έχει βρεθεί πως τα ένζυμα ανταποκρίνονται πολύ γρήγορα γιατί συνδέονται άμεσα με τους μικροοργανισμούς. Αντίθετα, οι οργανισμοί που είναι μεγαλύτεροι σε μέγεθος έχουν μεγαλύτερους κύκλους ζωής, συχνά ζουν στην επιφάνεια του εδάφους και δεν επηρεάζονται γρήγορα από τις αλλαγές στο περιβάλλον τους, όπως είναι η άρδευση με λύματα. Για αυτό το λόγο η μέσο και μάκρο πανίδα θα πρέπει να χρησιμοποιείται ως δείκτης αποτίμησης ποιότητας του εδάφους σε πειράματα μεγαλύτερης κλίμακας, τα οποία θα έχουν πολύ μεγάλη διάρκεια.

Abstract

In recent years, due to population growth, urbanisation, climate change and the indiscriminate use of natural resources, the rational and sustainable management of water resources has become an issue of major social importance. The gradual decrease in rainfall, combined with the increase in water consumption, has led to water scarcity and depletion of water resources, with adverse consequences in the environmental, economic and social spheres.

In the context of sustainable development, a key concern is to find alternative water sources that will reduce environmental costs and help to conserve precious natural resources. Urban wastewater can be such an alternative water resource. The recovery and reuse of treated municipal wastewater is a fairly common practice in many parts of the world. Treated wastewater can be used to irrigate crops and urban and peri-urban green areas, to enrich the groundwater aquifer and for industrial use.

This paper examines the potential for reuse of wastewater as an alternative water resource to meet part of the irrigation needs and the impact of irrigation on soil health. In more detail, an assessment of the impact of irrigation on biodiversity and abundance of organisms is carried out and the components that determine which are the appropriate indicators to assess soil health are explored.

In Chapter 2, an introduction to the reuse of reclaimed water is given, examples are given by country, the advantages of reuse, the categories of use, the separation of reclaimed water according to its quality are analysed and a direct link is made between reuse and the circular economy. The legislative framework and the criteria governing the reuse of reclaimed water, the characteristics of wastewater and the effects that irrigation with wastewater can have on the soil are also analysed.

In addition, soil quality and the term 'soil health' are discussed, with particular emphasis on the biodiversity and abundance of soil organisms. A full description of these organisms, such as micro-organisms, medium-large fauna and microfauna, is given. Particular emphasis is also placed on enzymes, which play an important role as they are directly linked to the functionality of micro-organisms. In addition, the choice of indicators that make it possible to determine soil quality is of great importance.

Chapter 3 provides a critical review of the studies, results and methods concerning the effect of wastewater on microorganisms, the studies that used medium and macrofauna as indicators and studies that dealt with the effect of wastewater on the enzymatic activity of microorganisms.

The conclusions drawn from the above analysis are that microorganisms are the most appropriate indicators for assessing soil health because they react quickly to environmental changes and give immediate results. Moreover, it has been found by all researchers involved in soil studies that enzymes respond very quickly because they are directly linked to microorganisms. In contrast, organisms that are larger in size have longer life cycles, often live on the surface of the soil and are not quickly affected by changes in their environment, such as sewage irrigation. For this reason, medium and macro fauna should be used as an indicator for assessing soil quality in larger-scale experiments, which will be of very long duration.

1 Εισαγωγή

Η συνεχής πληθυσμιακή αύξηση, η ρύπανση και η υποβάθμιση τόσο των επιφανειακών όσο και των υπόγειων υδάτων, η άνιση κατανομή των υδάτινων πόρων (μεγάλη κατανάλωση νερού από τον κλάδο της γεωργίας) και οι περιοδικές ξηρασίες, έχουν καταστήσει αναγκαία τη διερεύνηση και ανάπτυξη νέων, μη συμβατικών πηγών νερού. Στις αναπτυσσόμενες, βιομηχανικές χώρες αυξάνονται και εντείνονται τα προβλήματα που σχετίζονται με τη διασφάλιση της παροχής υδάτων και της διαχείρισης των αστικών και βιομηχανικών υγρών αποβλήτων. Στις αναπτυσσόμενες χώρες και ιδιαίτερα σε αυτές με ξηρικά και ημιξηρικά χαρακτηριστικά, υπάρχει ακόμη η ανάγκη ανάπτυξης κατάλληλων υποδομών για την παροχή πόσιμου νερού στους καταναλωτές αλλά και για τη διαχείριση των λυμάτων με στόχο την προστασία της δημόσιας υγείας και του περιβάλλοντος (Αγγελάκης, 2000).

Η σοβαρή επίδραση των υγρών αποβλήτων στο περιβάλλον, δηλαδή η ποιοτική υποβάθμιση του νερού, η ρύπανση ακτών και θαλασσών και η δημιουργία αισθητικών και άλλων προβλημάτων, έχει επιβάλλει τη λήψη σημαντικών διαχειριστικών μέτρων. Η διαχείριση των υγρών αποβλήτων στοχεύει:

- Στη μείωση της ρυπαντικής επίδρασης των υγρών αποβλήτων, ώστε να προστατεύεται η δημόσια υγεία και οι ανεπιθύμητες επιδράσεις τους στο περιβάλλον να περιορίζονται,
- Στην εξοικονόμηση πηγών νερού, που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν σε άλλες χρήσεις και

Σήμερα, η ανάκτηση και επαναχρησιμοποίηση εκροών υγρών αποβλήτων θεωρείται ότι συμβάλλει στην (Αγγελάκης, 2000):

- Ανάπτυξη νέων μη συμβατικών υδατικών πόρων (ανακτημένο νερό)
- Προστασία υπαρχόντων υδατικών πόρων, κυρίως σε παράκτιες περιοχές, όπου παρατηρείται διείσδυση αλμυρού νερού σε υπόγειους υδροφορείς
- Μείωση του κόστους διαχείρισης του νερού
- Ανάπτυξη πολιτικής υδατικών πόρων με έμφαση τη διατήρηση πηγών και του φυσικού περιβάλλοντος
- Αξιοπιστία της υδατοπρομήθειας, ιδιαίτερα σε αγροτικές περιοχές
- Ανάπτυξη πολιτικής υδατικών πόρων με έμφαση τη διατήρηση πόρων και φυσικού περιβάλλοντος.
- Σε οικονομικό όφελος με τον εφοδιασμό με νερό και θρεπτικά στοιχεία φυτών δένδρων, κατάλληλων για αγροτική εκμετάλλευση ανάπτυξη χώρων πρασίνου και αναψυχής.

Είναι ευρύτατα αποδεκτό ότι οι εκροές της τριτοβάθμιας επεξεργασίας υγρών αποβλήτων (ανακτημένο νερό) αποτελούν ασφαλές και βιώσιμο υδατικό πόρο, ιδιαίτερα κατάλληλο για γεωργική χρήση. Επίσης, είναι γνωστή η χρήση τέτοιων νερών για πυροπροστασία κυρίως δασικών εκτάσεων, όπως και η χρήση του ανακτημένου νερού για το πότισμα αστικού και περιαστικού πρασίνου (π.χ. νεκροταφεία, γήπεδα γκολφ, εγκαταστάσεις αναψυχής).

1.1 Επαναχρησιμοποίηση ανακτημένου νερού

Η επαναχρησιμοποίηση λυμάτων μειώνει τις ανάγκες σε κατανάλωση φρέσκου νερού και επομένως την ανάγκη δημιουργίας νέων φραγμάτων. Επίσης μειώνει τον όγκο των επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων που καταλήγουν στη θάλασσα.

Το ανακτημένο νερό που προέρχεται από την τριτοβάθμια επεξεργασία λυμάτων είναι μια αξιόπιστη πηγή νερού, καθώς προσθέτει σημαντικές ποσότητες στο υδατικό ισοζύγιο και παράλληλα επιτρέπει την εξοικονόμηση φρέσκου νερού στα επιφανειακά ύδατα και τους υπόγειους υδροφορείς. Επιπλέον, η χρήση επεξεργασμένων λυμάτων βοηθάει στη μείωση των λιπασμάτων καθώς περιέχουν θρεπτικά στοιχεία τα οποία αντισταθμίζουν την ανάγκη για συμπληρωματικά λιπάσματα. Ένα άλλο πλεονέκτημα είναι ότι η παραγωγή τους είναι συνήθως συνεχής, αφού οι μονάδες επεξεργασίας λυμάτων λειτουργούν καθημερινά όλο τον χρόνο. Από την άλλη μεριά, είναι ζωτικής σημασίας να ορίζονται αυστηροί δείκτες και όρια έτσι ώστε να μην προκληθούν προβλήματα στην δημόσια υγεία αλλά και στις καλλιέργειες. Σε όλα τα στάδια πρέπει να διεξάγονται συχνοί έλεγχοι και συντηρήσεις προκειμένου να διαπιστωθούν τυχόν αστοχίες του συστήματος.

Οι κατηγορίες χρήσεις του επεξεργασμένου νερού χωρίζονται ως εξής :

- Για αγροτική χρήση, η οποία κατηγοριοποιείται σε:
 - ✓ *περιορισμένη άρδευση*: μόνο καλλιέργειες όπου τα προϊόντα καταναλώνονται μετά από θερμική ή άλλου είδους επεξεργασία, δεν προορίζονται για ανθρώπινη κατανάλωση, οι καρποί τους δεν έρχονται σε άμεση επαφή με το έδαφος κατά τη διαδικασία συλλογής τους, όπως για παράδειγμα καλλιέργειες ζωοτροφών, λιβάδια, βιομηχανικές καλλιέργειες. Στην περιορισμένη άρδευση δεν επιτρέπεται η εφαρμογή του καταιονισμού ως μεθόδου άρδευσης. Η πρόσβαση του κοινού στην αρδευόμενη έκταση πρέπει να απαγορεύεται.
 - ✓ *απεριόριστη άρδευση*: είδη καλλιεργειών όπου τα προϊόντα καταναλώνονται ωμά, όπως για παράδειγμα λαχανικά, αμπέλια, οπωροφόρα δέντρα. Στις περιπτώσεις αυτές επιτρέπονται διάφοροι τύποι άρδευσης, συμπεριλαμβανομένου του καταιονισμού, ενώ δεν υπάρχουν περιορισμοί στην πρόσβαση του κοινού
- Για ύδρευση: εφαρμόζεται σε ελάχιστες περιοχές παγκοσμίως καθώς ενέχει κινδύνους για τη δημόσια υγεία και δεν έχει τεκμηριωθεί πλήρως η ασφάλεια πόσης ανακτημένου νερού. Κατηγοριοποιείται ως εξής:
 - ✓ άμεση πόση
 - ✓ έμμεση πόση: τροφοδοτούνται ποτάμια ή υπόγειοι υδροφορείς από τους οποίους γίνεται λήψη νερού για πόσιμους σκοπούς.
- Για αστική χρήση, η οποία περιλαμβάνει άρδευση δημοσίων πάρκων, κέντρων αναψυχής, νεκροταφείων, αθλητικών χώρων, χώρων πρασίνου δημόσιων κτιρίων, εμπορικές χρήσεις, πυροπροστασία, σιντριβάνια.

- Για βιομηχανική χρήση, όπου το ανακτημένο νερό χρησιμοποιείται κυρίως ως :
 - ✓ Νερό ψύξης
 - ✓ Νερό τροφοδοσίας λεβήτων
 - ✓ Νερό κατεργασίας η βιομηχανικό νερό
- Για εμπλουτισμό υπόγειων υδροφορέων, όταν ο υδροφορέας δεν χρησιμοποιείται για σκοπούς ύδρευσης.
- Για αποκατάσταση φυσικού περιβάλλοντος, δηλαδή δημιουργία τεχνητών υδροβιότοπων, χώρων αναψυχής, αύξηση παροχής επιφανειακών ρευμάτων, ανάπτυξη αισθητικής αξίας της περιοχής κ.λπ.

Το ανακτημένο νερό διαχωρίζεται επίσης και ανάλογα με την ποιότητά του ως εξής :

- Ανακυκλωμένο νερό κατηγορίας Α, το οποίο χρησιμοποιείται για :
 - ✓ Αστική χρήση (μη πόσιμο) με πρόσβαση του κοινού
 - ✓ Γεωργική χρήση με ανθρώπινες καλλιέργειες τροφίμων που καταναλώνονται ωμά.
 - ✓ Βιομηχανική χρήση με ανοιχτά συστήματα με δυνατότητα έκθεσης εργαζομένων.
 - ✓ Όλες τις χρήσεις των παρακάτω κατηγοριών.
- Ανακυκλωμένο νερό κατηγορίας Β, το οποίο χρησιμοποιείται για :
 - ✓ Βιομηχανική χρήση, για παράδειγμα για ξέπλυμα μηχανημάτων.
 - ✓ Γεωργική χρήση, για παράδειγμα για βοσκή ζώων.
- Ανακυκλωμένο νερό κατηγορίας C, το οποίο χρησιμοποιείται για :
 - ✓ Αστική χρήση (μη πόσιμο) με ελεγχόμενη πρόσβαση του κοινού
 - ✓ Γεωργική χρήση με ανθρώπινες καλλιέργειες τροφίμων που καταναλώνονται μαγειρεμένες ή επεξεργασμένες.
 - ✓ Βιομηχανική χρήση με συστήματα χωρίς δυνατότητα έκθεσης εργαζομένων.
- Ανακυκλωμένο νερό κατηγορίας D, το οποίο χρησιμοποιείται για :
 - ✓ Γεωργική χρήση με μη εδώδιμες καλλιέργειες τροφίμων.

Το νομοθετικό πλαίσιο για την επεξεργασία λυμάτων ξεκινά το 1991 οπότε η Ευρωπαϊκή Ένωση εξέδωσε την Οδηγία 91/271/ΕΟΚ περί επεξεργασίας και διάθεσης αστικών λυμάτων και έπειτα την Οδηγία 98/15/ΕΚ η οποία διευκρίνιζε ορισμένους κανόνες της πρώτης Οδηγίας που ερμηνεύτηκαν διαφορετικά σε κάποιες χώρες. Οι βασικοί στόχοι της Οδηγίας 91/271/ΕΟΚ είναι η προστασία του υδάτινου περιβάλλοντος από τις επιπτώσεις των αστικών λυμάτων και η θέσπιση συλλογικών πλαισίων για τη συλλογή, επεξεργασία και απόρριψη τους. Η Ελλάδα ενσωμάτωσε την παραπάνω Οδηγία με την Κ.Υ.Α. 5673/400/1997 (Φ.Ε.Κ. 192/Β/14-3-1997) με τίτλο "Μέτρα και Όροι για την επεξεργασία Αστικών Λυμάτων" και την τροποποίησε με την Κ.Υ.Α. 19661/939/1999 (Φ.Ε.Κ. 1811/Β/29-9-1999) με τίτλο "Τροποποίηση της Κ.Υ.Α. 5673 - Κατάλογος ευαίσθητων περιοχών". Στη συνέχεια, το 2000 εκδόθηκε η Οδηγία 2000/60/ΕΚ η οποία θέσπισε το πλαίσιο κοινοτικής δράσης στον τομέα της πολιτικής των υδάτων και ενσωματώθηκε στο ελληνικό δίκαιο με τον Νόμο 3199/2003 και το Προεδρικό Διάταγμα 51/2007. Η Κ.Υ.Α. 145116/2011 καθόρισε τα μέτρα, τους όρους

και τις διαδικασίες για την επαναχρησιμοποίηση επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων και τροποποιήθηκε με την Κ.Υ.Α. 191002/2013. Αυτή η ΚΥΑ αποτελεί μέχρι σήμερα το νομικό πλαίσιο που διέπει την Ελλάδα σε σχέση με την επαναχρησιμοποίηση των λυμάτων.

Τέλος, το 2020 εκδόθηκε ο Ευρωπαϊκός Κανονισμός 2020/741, ο οποίος έχει ως στόχο τη διασφάλιση της ποιότητας του ανακτημένου νερού έτσι ώστε να είναι ιδανικό για άρδευση και παράλληλα την προώθηση της κυκλικής οικονομίας. Επίσης, θεσπίζει τα ελάχιστα κριτήρια που πρέπει να πληρούν τα επεξεργασμένα λύματα προκειμένου να οδηγηθούν για επαναχρησιμοποίηση.

Στην Ευρωπαϊκή Ένωση, η επαναχρησιμοποίηση λυμάτων είναι σχετικά περιορισμένη και εφαρμόζεται σε συγκεκριμένες χώρες, κυρίως στις Νότιες, οι οποίες αντιμετωπίζουν προβλήματα λειψυδρίας, σε αντίθεση με τις Βόρειες οι οποίες διαθέτουν περισσότερους υδάτινους πόρους.

1.2 Κυκλική Οικονομία

Η παγκόσμια κατανάλωση υλικών όπως βιομάζα, ορυκτά καύσιμα και μέταλλα αναμένεται να διπλασιαστεί τα επόμενα σαράντα χρόνια, ενώ η ετήσια παραγωγή αποβλήτων προβλέπεται να αυξηθεί κατά 70% έως το 2050. Επομένως, έχει ανακύψει η ανάγκη για να αναπτυχθούν μοντέλα με οικολογικό σχεδιασμό στοχεύοντας στην ανακούφιση του περιβάλλοντος από τη βιομηχανική δραστηριότητα. Η Κυκλική οικονομία αποτελεί ένα παραγωγικό και καταναλωτικό μοντέλο που αποσκοπεί στην αύξηση της αποδοτικότητας των πρώτων υλών, μέσω της χρήσης των υλικών για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα, με ελαχιστοποίηση της χρήσης φυσικών πόρων.

Σύμφωνα με την πλειοψηφία των ερευνητών στην επιστημονική κοινότητα ο πιο διαδεδομένος ορισμός της Κυκλικής οικονομίας έχει καταγραφεί από το ίδρυμα “Ellen Mac Arthur” (Geissdoerfer et al.,2017):

Η Κυκλική οικονομία βασίζεται σε αρχές όπως ο κατάλληλος σχεδιασμός των προϊόντων στη βιομηχανική παραγωγή ώστε να είναι ανακυκλώσιμα, αφορά την επαναχρησιμοποίηση των υλικών από τα παραγόμενα προϊόντα και την αναγέννηση των φυσικών συστημάτων. Αντικαθιστά την έννοια του «τέλους της ζωής» με την αποθήκευση, μετατοπίζεται προς τη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, εξαλείφει τη χρήση τοξικών χημικών ουσιών που επηρεάζουν την επαναχρησιμοποίηση των αποβλήτων και στοχεύει στη δημιουργία ανακυκλώσιμων αποβλήτων μέσω του ανώτερου σχεδιασμού υλικών, προϊόντων, συστημάτων και επιχειρηματικών μοντέλων (Ghisellini,2016).

Η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει ορίσει την Κυκλική οικονομία ως μια επιχειρησιακή στρατηγική η οποία επαναπροσδιορίζει τις πρακτικές των συστημάτων παραγωγής, επανασχεδιάζει τις βιομηχανικές διεργασίες για να επαναχρησιμοποιούνται οι πρώτες ύλες, να ελαττώνονται οι βλαβερές ουσίες και να περιορίζονται οι εκπομπές βλαβερών καυσαερίων. Όλα τα παραπάνω οδηγούν σε αειφόρο οικονομική ανάπτυξη δίχως την αύξηση της κατανάλωσης φυσικών πόρων .

Η Κυκλική οικονομία ορίζεται γενικότερα ως ένα οικονομικό σύστημα που αντικαθιστά την έννοια «τέλος του κύκλου ζωής» με τη μείωση, την επαναχρησιμοποίηση, και την ανακύκλωση υλικών στην παραγωγή, στη διανομή και στις διαδικασίες κατανάλωσης διαμορφώνοντας μια κλειστή αλυσίδα. Λειτουργεί σε τρία επίπεδα, ανάλογα με το πλήθος των υποδομών που διαθέτει κάθε βιομηχανία για να διαχειρίζεται τα απόβλητα και την έκταση που καταλαμβάνουν οι εγκαταστάσεις της για αυτή την ενέργεια ως εξής (Κοντογιάννη,2021):

- Μικρό-επίπεδο (προϊόντα, εταιρείες, καταναλωτές).
- Μέσο-επίπεδο (οικολογικά βιομηχανικά πάρκα).
- Μακροοικονομικό-επίπεδο (πόλη, περιοχή, έθνος και πέραν αυτού).

Η Κυκλική οικονομία έχοντας σαν στόχο την επίτευξη βιώσιμης ανάπτυξης και τη δημιουργία περιβαλλοντικής ποιότητας, οικονομικής ευημερίας και κοινωνικής ισότητας ταυτοχρόνως προς όφελος των σημερινών και των μελλοντικών γενεών, ενεργοποιεί νέα επιχειρηματικά

μοντέλα, τα οποία αποτελούν πόλο έλξης για τις επιχειρήσεις, τα εργοστάσια και τις βιομηχανίες. Με αυτά τα νέα επιχειρηματικά μοντέλα δεν αντιμετωπίζεται η Κυκλική οικονομία σαν μια ακόμα προσπάθεια διάσωσης του πλανήτη με καλύτερη διαχείριση των φυσικών πόρων που χρησιμοποιούνται κατά τη διάρκεια της παραγωγής αλλά σαν μια καινοτόμα επιχειρησιακή μορφή η οποία, όπως θα αποδειχθεί και στη συνέχεια, είναι οικονομικά αποδοτικότερη από την παραδοσιακή μορφή. Παράλληλα επαναχρησιμοποιούνται οι πρώτες ύλες εφόσον με τον καιρό στερεύουν οι φυσικές πηγές εξόρυξης πρώτων υλών και αναζητούνται νέες εναλλακτικές για τον περιορισμό της πλήρωσης των χώρων υγειονομικής ταφής.

Στόχος της Κυκλικής οικονομίας είναι η οικονομική και επιχειρησιακή ανάπτυξη χωρίς την επιβάρυνση του περιβάλλοντος με τέτοιο τρόπο ώστε να αποφευχθεί η εξάντληση των φυσικών πόρων. Στον πίνακα απεικονίζονται οι βασικές αρχές ενός συστήματος που έχει υιοθετήσει την Κυκλική οικονομία.

Πίνακας 1: Βασικές αρχές ενός συστήματος που έχει υιοθετήσει την Κυκλική οικονομία (Κοντογιάννη,2021)

Βασικές αρχές	Ενέργειες
Μείωση	<ul style="list-style-type: none"> • Επανασχεδίαση διαδικασιών • Επανεξέταση παραγωγής προϊόντων • Ελαχιστοποίηση χρήσης περιττών πόρων
Επαναχρησιμοποίηση	<ul style="list-style-type: none"> • Αναγέννηση αποβλήτων και επαναχρησιμοποίησή τους
Ανακύκλωση	<ul style="list-style-type: none"> • Ανακατασκευή και ανακύκλωση προϊόντων με στόχο την ανάπτυξη ενός κλειστού βρόχου στον κύκλο ζωής τους • Διατήρηση των υλικών και επαναφορά τους στην παραγωγική διαδικασία ώστε να συμβάλουν στην οικονομία όσο το δυνατόν περισσότερο
Ανάκτηση	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Προϊόντων , ανάκτηση ενέργειας

1.3 Σκοπός και δομή εργασίας

Ο σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η διερεύνηση της εφαρμογής κατάλληλων δεικτών για την αποτίμηση της βιοποικιλότητας σε καλλιέργειες οι οποίες αρδεύονται με λύματα. Το πρώτο κεφάλαιο περιλαμβάνει γενικά στοιχεία για την υποβάθμιση των επιφανειακών και υπόγειων νερών αλλά και για το πρόβλημα της λειψυδρίας. Επιπρόσθετα, παρουσιάζονται γενικές πληροφορίες για την επαναχρησιμοποίηση ανακτημένου νερού από λύματα και την κυκλική οικονομία.

Στο δεύτερο κεφάλαιο πραγματοποιείται μία βιβλιογραφική ανασκόπηση. Περιλαμβάνει θέματα που αφορούν τα χαρακτηριστικά των υγρών αποβλήτων και πως αυτά επηρεάζουν την ανθρώπινη υγεία. Επιπροσθέτως, παραθέτει τα κριτήρια της νομοθεσίας της ΕΕ, της Ελληνικής νομοθεσίας και του Παγκόσμιου Οργανισμού Υγείας για την επαναχρησιμοποίηση αποβλήτων στην άρδευση ενώ παράλληλα παραθέτει παραδείγματα για το πως η άρδευση με λύματα συμβάλλει θετικά στην υγεία του εδάφους σε χώρες εντός και εκτός της Ευρώπης. Ορίζεται η ποιότητα και υγεία του εδάφους ενώ παράλληλα επισημαίνεται πως η άρδευση με υγρά απόβλητα μπορεί να την επηρεάσει. Δίνεται ο ορισμός της βιοποικιλότητας, της αφθονίας μικροοργανισμών και πραγματοποιείται εκτενής ανάλυση για τους οργανισμούς που υπάρχουν στο έδαφος. Τέλος, αναλύεται η επιλογή των δεικτών και των παραμέτρων που θα καταστήσουν δυνατό τον προσδιορισμό της ποιότητας του εδάφους.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι μέθοδοι της βιβλιογραφικής ανασκόπησης αλλά και τα αποτελέσματα που προέκυψαν από αυτή ενώ παράλληλα γίνεται διερεύνηση δεικτών αποτίμησης της βιοποικιλότητας. Αναλύεται, η επίδραση που έχει η άρδευση με λύματα στους μικροοργανισμούς του εδάφους, σε μέσο και μακρο πανίδα αλλά και στα ένζυμα.

Στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται επισήμανση των βασικών συμπερασμάτων που απορρέουν από τη συγκεκριμένη εργασία.

Στο πέμπτο κεφάλαιο, ακολουθεί η βιβλιογραφία.

2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση

2.1 Χαρακτηριστικά των υγρών αποβλήτων

Τα υγρά απόβλητα αποτελούνται κατά 99,9 % από νερό με σχετικά μικρή περιεκτικότητα αιωρούμενων και διαλυμένων οργανικών και ανόργανων ουσιών. Τυπική σύσταση των αστικών υγρών αποβλήτων (λυμάτων) δίνεται στον Πίνακα 2.

Τα αστικά λύματα περιέχουν τόσο εύκολα βιοδιασπάσιμες ουσίες (π.χ. οξικό οξύ, γλυκόζη) όπως και δύσκολα βιοδιασπάσιμες ουσίες. Επίσης περιέχουν αζωτούχες ουσίες (π.χ. ουρία) και φώσφορο ο οποίος προέρχεται σε μεγάλο βαθμό από τη χρήση των απορρυπαντικών. Τα αστικά λύματα περιέχουν επίσης βαρέα μέταλλα (π.χ. χρώμιο, νικέλιο, χαλκό) αλλά σε πολύ μικρές συγκεντρώσεις της τάξης των μερικών μg ανά λίτρο και σε αυτές τις συγκεντρώσεις δεν φαίνεται να δημιουργούν προβλήματα κατά την άρδευση των καλλιεργειών.

Ωστόσο η παρουσία οργανικών μικρορρύπων στα αστικά λύματα (φαρμακευτικές ουσίες, ορμόνες, αντιβιοτικά, ενδοκρινικοί διαταράκτες, κ.ά.) πρέπει να ερευνάται με προσοχή, για να αποφεύγεται δημιουργία προβλημάτων στα φυτά και στους ανθρώπους, παρότι αυτά απαντώνται στα λύματα σε μικρές συγκεντρώσεις. Τα συστατικά των υγρών αποβλήτων που πρέπει να εξετάζονται προσεκτικά, όταν αυτά πρόκειται να επαναχρησιμοποιηθούν για αρδευτικούς σκοπούς, δίνονται στους Πίνακες 3 και 4.

2.1.1 Δυσμενείς επιπτώσεις από την επαναχρησιμοποίηση λυμάτων

Καθώς ο κύριος όγκος των αστικών υγρών αποβλήτων αποτελείται από οικιακές εκροές, οι παθογόνοι μικροοργανισμοί που βρίσκονται στις ανθρώπινες εκκρίσεις υπάρχουν και στα υγρά απόβλητα, με συνέπεια την πιθανή διάδοση διαφόρων μολυσματικών ασθενειών. Η διάδοση μολυσματικών ασθενειών προερχόμενα από τα αστικά υγρά απόβλητα έχει εξαλειφθεί στις ανεπτυγμένες χώρες τις τελευταίες δεκαετίες, εξαιτίας της βελτίωσης των συνθηκών υγιεινής και της αποτελεσματικής επεξεργασίας των λυμάτων. Βέβαια, οι παθογόνοι οργανισμοί που ήταν υπεύθυνοι για τις επιδημίες του παρελθόντος είναι ακόμη παρόντες στα αστικά υγρά απόβλητα με αποτέλεσμα τη διάδοση ασθενειών σε αναπτυσσόμενες χώρες. Τα προβλήματα υγείας που είναι δυνατό να προκληθούν από τη χρήση ανεπεξέργαστων ή μερικώς επεξεργασμένων αποβλήτων έχουν μελετηθεί σε μεγάλο βαθμό από τους Feachem et al. (1980), Mara and Caimcross (1989).

Οι μικροβιολογικές παράμετροι είναι ενδεικτικές δυνητικών ασθενειών που μεταδίδονται με το νερό και σχετίζονται συνήθως με συγκεκριμένα βακτηρίδια, ιούς και πρωτόζωα. Οι παθογόνοι οργανισμοί στο νερό συνήθως δεν είναι αυτόχθονοι στο φυσικό υδάτινο περιβάλλον, αλλά εισάγονται με τα περιττώματα ζώων και ανθρώπων. Με την εισαγωγή τους στο νερό υφίστανται φθορά. Ωστόσο ορισμένοι μπορούν να επιβιώσουν

σε σημαντικούς αριθμούς και για σημαντικό χρονικό διάστημα που ανάλογα με τις συνθήκες (θερμοκρασία, ηλιοφάνεια, κ.α) κυμαίνονται από λίγες ημέρες μέχρι αρκετές εβδομάδες. Τα χρονικά αυτά διαστήματα είναι επαρκή ώστε με τη χρήση του νερού, για διατροφικούς κυρίως σκοπούς, να επανέλθουν στο πιο φιλικό για αυτά περιβάλλον του ανθρώπινου σώματος και των ζώων. Στο περιβάλλον αυτό μπορούν να αναπτυχθούν και να προκαλέσουν ασθένειες. Η εκδήλωση και η σοβαρότητα των ασθενειών αυτών εξαρτάται από την ικανότητα του ανοσοποιητικού συστήματος να τις καταπολεμήσει. Οι σημαντικότερες ασθένειες που μεταδίδονται με το νερό είναι ο τύφος, ο παράτυφος, η χολέρα, η δυσεντερία, η ηπατίτιδα Α, η λεπτοσπείρωση, γαστρεντερίτιδες και άλλες ασθένειες (Ανδρεαδάκης, 2008).

Σημαντικό θέμα που έχει προκύψει τα τελευταία χρόνια έχει να κάνει με τους οργανικούς ρύπους που περιέχονται στα αστικά λύματα όπως είναι οι φαρμακευτικές ουσίες, τα προϊόντα προσωπικής φροντίδας κτλ.

Πίνακας 2: Τυπική σύσταση ανεπεξέργαστων αστικών υγρών αποβλήτων

Συστατικά	Όρια συγκέντρωσης		
	Μεγάλη	Μέση	Μικρή
Ολικά στερεά (mg/L)	1200	720	350
Ολικά Διαλυμένα στερεά (mg/L)	850	500	250
Ολικά Αιωρούμενα στερεά (mg/L)	350	220	100
Καθιζάνοντα στερεά (mL/L)	20	10	5
Βιοχημική απαίτηση οξυγόνου (BOD ₅ , mg/L)	400	220	110
Ολικός οργανικός άνθρακας (TOC, mg/L)	290	160	80
Χημική απαίτηση οξυγόνου (COD, mg/L)	1000	500	250
Άζωτο ολικό (mgN/L)	85	40	20
Οργ.-N (mgN/L)	35	15	8
NH ₄ -N (mgN/L)	50	25	12
NO ₂ -N (mgN/L)	0	0	0
NO ₃ -N (mgN/L)	0	0	0
Ολικός Φώσφορος (mgP/L)	15	8	4
Οργανικός Φώσφορος (mgP/L)	5	3	1
Ανόργανος Φώσφορος (mgP/L)	10	5	3
Χλωριόντα (mg/L)	100	50	30
Αλκαλικότητα (ως mg/L CaCO ₃)	200	100	50
Λίπη-Έλαια (mg/L)	150	100	50
Ολικά κολοβακτηρίδια, MPN/100 mL	-	-	-
Κολοβακτηρίδια εντερικής προέλευσης MPN/100 mL	-	-	-
Ιοί, PFU/100 mL	-	-	-

Καθώς οι κίνδυνοι από τη χρήση των υγρών αποβλήτων για την ανθρώπινη υγεία είναι υπαρκτοί, τα ποιοτικά κριτήρια και η αξιολόγηση της καταλληλότητας των υγρών αποβλήτων για αρδευτικούς σκοπούς έχουν σαν κύριο στόχο την προστασία της δημόσιας υγείας και του περιβάλλοντος. Πολλές χώρες σε ξηρές ή ημίξηρες περιοχές, όπου κατά κύριο λόγο εφαρμόζεται επαναχρησιμοποίηση των υγρών αποβλήτων, έχουν θεσπίσει κριτήρια μικροβιακής ποιότητας για να εξασφαλίσουν τη χωρίς κινδύνους χρήση των υγρών αποβλήτων.

Πίνακας 3: Συστατικά των αστικών υγρών αποβλήτων που πρέπει να παρακολουθούνται

Συστατικά	Μετρούμενες παράμετροι	Αιτία ελέγχου
Αιωρούμενα στερεά	Αιωρούμενα στερεά που περιλαμβάνουν ασταθείς και σταθερές ενώσεις	Τα αιωρούμενα στερεά μπορεί να οδηγήσουν στη δημιουργία λασπωδών ιζημάτων και αναερόβιων συνθηκών, όταν ανεπεξέργαστα υγρά απόβλητα εκβάλλουν σε υδάτινο περιβάλλον ή στο έδαφος. Υπερβολική ποσότητα αιωρούμενων στερεών.
Βιοδιασπώμενη οργανική ύλη	Βιοχημική (Biological Oxygen Demand) και χημική (Chemical Oxygen Demand) απαίτηση οξυγόνου	Συνίσταται κυρίως από πρωτεΐνες, υδρογονάνθρακες και λίπη. Όταν αποβάλλονται σε φυσικά συστήματα, η βιολογική τους αποσύνθεση μπορεί να οδηγήσει σε έλλειμμα διαλυμένου οξυγόνου στους υδάτινους αποδέκτες και στο έδαφος και στην ανάπτυξη σηπτικών συνθηκών.
Παθογόνοι μικροοργανισμοί	Ενδεικτικοί μικροοργανισμοί, ολικά και εντερικής προέλευσης κολοβακτηρίδια	Μπορεί να μεταδοθούν ασθένειες από βακτήρια, ιούς και παράσιτα των υγρών αποβλήτων μέσω του νερού, εδάφους και φυτών.
Θρεπτικά στοιχεία	Άζωτο, φώσφορος, κάλιο	Το άζωτο, ο φώσφορος και το κάλιο είναι ουσιώδη θρεπτικά στοιχεία για την ανάπτυξη των φυτών και η παρουσία τους κατά κανόνα επαυξάνει την αξία του νερού. Όταν εκβάλλουν σε υδάτινο περιβάλλον, το άζωτο και ο φώσφορος μπορεί να προκαλέσουν ανάπτυξη ανεπιθύμητης δραστηριότητας (υδροχαρής βλάστηση, ευτροφισμός). Όταν αποβάλλονται σε μεγάλες ποσότητες στο έδαφος το άζωτο μπορεί να προκαλέσει (νίτρο)ρύπανση των υπόγειων υδροφορέων.
Συγκέντρωση ιόντων υδρογόνου	pH	Το pH των αποβλήτων επηρεάζει τη διαλυτότητα των μετάλλων όπως επίσης και τη νατρίωση των εδαφών. Το συνηθισμένο εύρος pH σε υγρά αστικά απόβλητα είναι 6.5-8.5, αλλά οι βιομηχανικές εκροές μπορεί να μεταβάλλουν το pH σημαντικά.
Βαρέα μέταλλα	Επιλεγμένα στοιχεία (π.χ. Cd, Zn, Ni, Hg)	Κάποια από τα βαρέα μέταλλα συσσωρεύονται στο περιβάλλον και ασκούν τοξική δράση στα φυτά και στα ζώα. Η παρουσία τους σε ορισμένες συγκεντρώσεις μπορεί να καταστήσει τα απόβλητα ακατάλληλα για άρδευση.
Διαλυμένα ανόργανα	Ολικά διαλυμένα στερεά, ηλεκτρική αγωγιμότητα, επιλεγμένα στοιχεία (π.χ. Na, Ca, Mg, Cl, B)	Υπερβολική αλατότητα μπορεί να προξενήσει ζημιές σε κάποιες καλλιέργειες. Ορισμένα ιόντα, όπως το χλώριο, το νάτριο και το βόριο, δρουν τοξικά σε κάποια φυτά. Το νάτριο μπορεί να δημιουργήσει και προβλήματα δομής στο έδαφος.
Υπολειμματικό χλώριο	Ελεύθερο και δεσμευμένο χλώριο	Υπερβολική ποσότητα ελεύθερου χλωρίου (> 0.05 mg/L Cl ₂) μπορεί να προκαλέσει εγκαύματα στα φύλλα και γενικά να προξενήσει ζημιές σε ορισμένες καλλιέργειες. Ωστόσο, το μεγαλύτερο μέρος του χλωρίου σε ανακυκλωμένα απόβλητα βρίσκεται υπό μορφή ενώσεων, που γενικά δεν προκαλούν ζημιές στα φυτά. Προσοχή πρέπει να δίνεται στην πιθανότητα μόλυνσης των υπόγειων υδροφορέων με τις ιδιαίτερα τοξικές οργανοχλωριωμένες ενώσεις.

Οργανικοί Μικρορρύποι	Ολικές συγκεντρώσεις φαρμακευτικών, φυτοφαρμάκων, προϊόντα προσωπικής περιποίησης	
----------------------------------	---	--

2.2 Νομοθετικό πλαίσιο και κριτήρια που διέπουν την επαναχρησιμοποίηση του ανακτημένου νερού

Ορισμένες χώρες (π.χ. Ιταλία, Ελλάδα, Κύπρος, Ισπανία, Ισραήλ) και πολιτείες των Η.Π.Α. έχουν θεσπίσει κανονισμούς επαναχρησιμοποίησης των αστικών υγρών αποβλήτων ανά χρήση. Με την ανάπτυξη των τεχνολογιών ανάκτησης και επαναχρησιμοποίησης εκρών υγρών αποβλήτων, παρατηρείται μια έντονη δραστηριότητα ανάπτυξης και θέσπισης τέτοιων κριτηρίων. Επίσης, σε άλλες χώρες εκσυγχρονίζονται και αναπροσαρμόζονται οι ισχύοντες κανονισμοί. Πλέον, υπάρχει σε επίπεδο Ευρωπαϊκής Ένωσης Κανονισμός που διέπει την επαναχρησιμοποίηση του ανακτημένου νερού για τη γεωργία.

2.2.1 Ελληνική Νομοθεσία

Η επαναχρησιμοποίηση λυμάτων στην Ελλάδα ορίζεται από την Κ.Υ.Α. 145116/2011 (Φ.Ε.Κ. 354B/8-3-2011) με τίτλο «Καθορισμός μέτρων, όρων και διαδικασιών για την επαναχρησιμοποίηση επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων και άλλες διατάξεις» και με την τροποποίηση της με την ΚΥΑ 191002/2013. Το πεδίο εφαρμογής της Κ.Υ.Α. περιλαμβάνει την επαναχρησιμοποίηση υγρών αποβλήτων για άρδευση, τροφοδότηση υπόγειων υδροφορέων, αστική - περιαστική χρήση και βιομηχανική χρήση καθώς και την επαναχρησιμοποίηση υγρών βιομηχανικών αποβλήτων σε αντίθεση με τον Ευρωπαϊκό Κανονισμό, ο οποίος αναφέρεται αποκλειστικά στην άρδευση. Η Κ.Υ.Α. διαχωρίζει την άρδευση σε περιορισμένη και απεριόριστη, ενώ ο Κανονισμός κατατάσσει το ανακτημένο νερό σε κατηγορίες ποιότητας (Α, Β, Γ, Δ). Η ΚΥΑ αντιστοιχίζει συγκεκριμένες χρήσεις του ανακτημένου νερού με συγκεκριμένες κατ' ελάχιστον απαιτήσεις επεξεργασίας και μικροβιολογικά όρια. Πιο συγκεκριμένα, η απεριόριστη άρδευση της Κ.Υ.Α., απαιτεί τουλάχιστον βιολογική επεξεργασία ακολουθούμενη από τριτοβάθμια επεξεργασία με φίλτρα και απολύμανση. Η αστική περι-αστική χρήση του νερού απαιτεί προχωρημένα συστήματα επεξεργασίας (βιοαντιδραστήρες μεμβρανών-MBR) και απολύμανση. Βρίσκεται κοντά με την ποιότητα νερού Α του Κανονισμού, αφού και οι δύο κατηγορίες αφορούν όλες τις καλλιέργειες, συμπεριλαμβανομένων και των καλλιεργειών των οποίων τα προϊόντα καταναλώνονται ωμά, και όλες τις μεθόδους άρδευσης. Η περιορισμένη άρδευση αντιστοιχεί στις κατηγορίες νερού Β, Γ και Δ καθώς αυτές περιλαμβάνουν καλλιέργειες των οποίων οι καρποί δεν έρχονται σε άμεση επαφή με το έδαφος ή με το ανακτημένο νερό, καλλιέργειες που θα υποστούν επεξεργασία και καλλιέργειες μη εδώδιμων φυτών. Όσον αφορά τις μεθόδους άρδευσης, η περιορισμένη άρδευση απαγορεύει την μέθοδο του καταιονισμού και η κατηγορία Γ επιτρέπει μόνο την στάγδην. Η περιορισμένη άρδευση περιλαμβάνει και τις τρεις κατηγορίες του Κανονισμού μαζί και ορίζει ένα όριο για κάθε παράμετρο. Ο Πίνακας 4 παρουσιάζει τα όρια των κύριων παραμέτρων που πρέπει να πληρούνται :

Πίνακας 4 :Σύγκριση απαιτήσεων ποιότητας ανακτημένου νερού απεριόριστης και περιορισμένης άρδευσης
Κ.Υ.Α (Πηγή: Κ.Υ.Α. 145116/2011, 2011)

Τύπος επαναχρησιμοποίησης	Escherichia coli (EC/100ml)	BOD5 (mg/L)	SS (mg/L)	Θολότητα (NTU)	Κατ' ελάχιστον απαιτούμενη επεξεργασία	Ελάχιστη συχνότητα δειγματοληψιών και αναλύσεων νερού προς επαναχρησιμοποίηση
<p>Περιορισμένη άρδευση Περιοχές που δεν αναμένεται πρόσβαση του κοινού, καλλιέργειες ζωοτροφών, βιομηχανικές καλλιέργειες, λιβάδια, δένδρα (μη συμπεριλαμβανομένων των οπωροφόρων), με την προϋπόθεση ότι κατά τη συλλογή οι καρποί δεν βρίσκονται σε επαφή με το έδαφος, καλλιέργειες σπόρων και καλλιέργειες που παράγουν προϊόντα τα οποία υποβάλλονται σε περαιτέρω επεξεργασία πριν την κατανάλωσή τους. Άρδευση με καταιονισμό δεν θα εφαρμόζεται.</p> <p>Βιομηχανική χρήση Νερό ψύξης μιας χρήσης</p> <p>Τροφοδότηση υπόγειων υδροφορέων που δεν εμπίπτουν στις διατάξεις του άρθρου 7 του ΠΔ 51/2-3-2007, (με την επιφύλαξη των παραγράφων 4 και 5 του άρθρου 5), με διήθηση διαμέσου εδαφικού στρώματος με επαρκές πάχος και κατάλληλα χαρακτηριστικά ^(v)</p>	≤200 Διάμεση τιμή	Σύμφωνα με τις επιταγές της ΚΥΑ 5673/400/1997	Σύμφωνα με τις επιταγές της ΚΥΑ 5673/400/1997	-	Δευτεροβάθμια βιολογική επεξεργασία ^(α) Απολύμανση ^(β)	BOD ₅ , SS, N, P: σύμφωνα με τις επιταγές της ΚΥΑ 5673/400/5.3.97 (ΦΕΚ 192/Β/14.3.97) EC: μία ανά εβδομάδα Υπολειμματικό χλώριο: συνεχώς (εφόσον εφαρμόζεται χλωρίωση)
<p>Απεριόριστη άρδευση Όλες οι καλλιέργειες όπως οπωροφόρα δένδρα, λαχανικά, αμπέλια ή καλλιέργειες των οποίων τα προϊόντα καταναλώνονται ωμά, θερμοκήπια. Η απεριόριστη άρδευση επιτρέπει την εφαρμογή διαφόρων μεθόδων εφαρμογής της άρδευσης συμπεριλαμβανομένου του καταιονισμού.</p> <p>Βιομηχανική χρήση πλην νερού ψύξης μιας χρήσης Επανακυκλοφορούμενο νερό ψύξης, νερό για λέβητες, νερό διεργασιών κλπ ^(z)</p>	≤ 5 για το 80% των δειγμάτων και ≤ 50 για το 95% των δειγμάτων	≤ 10 για το 80% των δειγμάτων	≤ 10 για το 80% των δειγμάτων	≤ 2 διάμεση τιμή	Δευτεροβάθμια βιολογική επεξεργασία ^(δ) ακολουθούμενη από τριτοβάθμια επεξεργασία και απολύμανση ^(ε)	BOD ₅ , SS, N, P: σύμφωνα με τις επιταγές της ΚΥΑ 5673/400/5.3.97 (ΦΕΚ 192/Β/14.3.97) Θολότητα και διαπερατότητα: για ανακτημένο νερό από εγκαταστάσεις επεξεργασίας με ισοδύναμο πληθυσμό μεγαλύτερο από 50000 κατοίκους τέσσερις ανά εβδομάδα και δύο ανά εβδομάδα στις υπόλοιπες περιπτώσεις EC: για ανακτημένο νερό από εγκαταστάσεις επεξεργασίας με ισοδύναμο πληθυσμό μεγαλύτερο από 50000 κατοίκους τέσσερις ανά εβδομάδα και δύο ανά εβδομάδα στις υπόλοιπες περιπτώσεις. Κατ' εξαίρεση για νησιωτικές περιοχές με τεκμηριωμένη έλλειψη κατάλληλης εργαστηριακής υποδομής μία ανά εβδομάδα

						Υπολειμματικό χλώριο: συνεχώς (εφόσον εφαρμόζεται χλωρίωση)
--	--	--	--	--	--	---

α) Οι προτεινόμενες μέθοδοι δευτεροβάθμιας επεξεργασίας περιλαμβάνουν διάφορους τύπους του συστήματος ενεργού ιλύος, βιολογικά φίλτρα και περιστρεφόμενους βιολογικούς δίσκους. Άλλα συστήματα που παράγουν εκροή με ισοδύναμη ποιότητα (BOD5/SS σε συμφωνία με τις απαιτήσεις της ΚΥΑ 5673/400/5.3.97 (ΦΕΚ 192/Β/14.3.97) είναι αποδεκτά κατόπιν επαρκούς τεκμηρίωσης. Οι συγκεντρώσεις αζώτου στην εκροή πρέπει να διατηρούνται χαμηλότερα από 45 mg/l, με εξαίρεση τις περιπτώσεις όπου υπάρχει μεγάλης διάρκειας αποθήκευση των υγρών αποβλήτων σε ταμειυτήρες, γίνεται άρδευση ευπρόσβλητων στη νιτρορρύπανση ζωνών ή γίνεται εμπλουτισμός του υπόγειου υδροφορέα. Στις περιπτώσεις αυτές οι μέσες συγκεντρώσεις αζώτου πρέπει να μην υπερβαίνουν τα 15 mg/l.

β) Χλωρίωση, οζόνωση, χρήση υπεριώδους ακτινοβολίας (UV) ή άλλου είδους μέθοδοι καταστροφής ή συγκρά- τησης παθογόνων, που εξασφαλίζουν στην εκροή την απαιτούμενη διάμεση συγκέντρωση Escherichia coli. Σε κάθε περίπτωση και στο βαθμό που η επεξεργασία συνίσταται στην ελάχιστη απαιτούμενη κατά την εφαρμογή της χλωρίωσης θα εξασφαλίζεται γινόμενο υπολειμματικού χλωρίου επί χρόνο επαφής (C·t) μεγαλύτερο ή ίσο από 30 mg·min/l, εμβολοειδής ροή (λόγος μήκους ροής/πλάτος μεγαλύτερο ή ίσο από 40) και ελάχιστος χρόνος επαφής 30 min, ενώ για απολύμανση με UV θα εξασφαλίζεται ελάχιστη δόση 70 mWsec/cm² στο τέλος της ζωής των λαμπτήρων και για τον σχεδιασμό του συστήματος UV δεν θα λαμβάνεται τιμή διαπερατότητας μεγαλύτερη από 50%. Θα πρέπει με κατάλληλη μελέτη, που συμπεριλαμβάνεται στη μελέτη σχεδιασμού και εφαρμογής να τεκμηριώνεται η επάρκεια, η αποτελεσματικότητα και κυρίως, η ευχέρεια ελέγχου της αποτελεσματικότητας της απολύμανσης.

γ) Θα πρέπει με κατάλληλη μελέτη να τεκμηριώνεται η επάρκεια του εδαφικού συστήματος να επιτυγχάνει συγκράτηση οργανικών.

δ) Όπως η σημείωση ^(α). Στην περίπτωση άρδευσης σε περιοχές που έχουν χαρακτηριστεί ως ευπρόσβλητες λόγω νιτρορύπανσης απαιτείται απομάκρυνση αζώτου μέσω νιτροποίησης – απονιτροποίησης, ώστε οι συγκεντρώσεις αμμωνιακού αζώτου και ολικού αζώτου να είναι μικρότερες από 2 mg/l και 15 mg/l αντίστοιχα στ) Κατάλληλο σύστημα που να επιτυγχάνει τα όρια για το BOD5, τα SS και τη θολότητα. Ενδεικτικά, κατ' ελάχιστον προσθήκη κατάλληλου κροκιδωτικού (π.χ.θειικού αργιλίου) σε δόση μεγαλύτερη από 10 mg/l και απευθείας διύλιση σε διυλιστήριο άμμου με τα ακόλουθα χαρακτηριστικά: βάθοςδιυλιστικού μέσου (L) ≥ 1,40 m, ενεργή διάμετρο κόκκων άμμου

(De) ≈ 1 mm, συντελεστή ομοιομορφίας κόκκων άμμου (μ) 1,45–1,60 και επιφανειακή φόρτιση ≤ 8 m³/m²/hr για κανονικές συνθήκες λειτουργίας.

^{ε)} Χλωρίωση, οζόνωση, χρήση υπεριώδους ακτινοβολίας (UV) ή άλλου είδους μέθοδος καταστροφής ή συγκρά- τησης παθογόνων, που εξασφαλίζουν στην εκροή την απαιτούμενη συγκέντρωση Escherichia coli για το 80% των δειγμάτων. Σε κάθε περίπτωση κατά την εφαρμογή της χλωρίωσης θα εξασφαλίζεται συγκέντρωση υπολειμμα- τικού χλωρίου ≥ 2 mg/l, εμβολοειδής ροή (λόγος μήκους ροής/πλάτος μεγαλύτερο ή ίσο από 40) και ελάχιστος χρόνος επαφής 60 min, ενώ η αναγκαιότητα αποχλωρίωσης πριν από την επαναχρησιμοποίηση θα εξετάζεται κατά περίπτωση. Για απολύμανση με UV θα εξασφαλίζεται ελάχιστη δόση 60 mWsec/cm² στο τέλος της ζωής των λαμπτήρων και για τον σχεδιασμό του συστήματος UV δεν θα λαμβάνεται τιμή διαπερατότητας μεγαλύτερη από 70%. Θα πρέπει με κατάλληλη μελέτη, που συμπεριλαμβάνεται στη μελέτη σχεδιασμού και εφαρμογής να τεκμηριώνεται η επάρκεια, η αποτελεσματικότητα και κυρίως, η ευχέρεια ελέγχου της αποτελεσματικότητας της απολύμανσης.

^{ζ)} Για νερό βιομηχανικών διεργασιών θα εφαρμόζονται από την ενδιαφερόμενη βιομηχανία τα εκάστοτε απαι- τούμενα πρόσθετα προχωρημένα συστήματα επεξεργασίας για απομάκρυνση ιόντων και άλλων διαλυμένων ενώσεων ή/και στοιχείων.

Πίνακας 5: Επιθυμητά αγρονομικά χαρακτηριστικά των προς άρδευση επαναχρησιμοποιούμενων επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων (Πηγή: Κ.Υ.Α. 145116/2011, 2011)

Πιθανό πρόβλημα κατά την άρδευση	Μονάδες	Βαθμός περιορισμών κατά την εφαρμογή		
		Μηδαμινός	Μικρός-Μέτριος	Μεγάλος
Αλατότητα (Επηρεάζει τη διαθεσιμότητα του νερού στο έδαφος)				
EC _w ⁽¹⁾	dS/m	< 0.7	0.7 -3.0	> 3.0
Ή				
TDS (Ολικά διαλυμένα)	mg/l	< 450	450 -2000	> 2000
Διαπερατότητα				
SAR ⁽²⁾ = 0 - 3 και EC _w =		> 0.7	0.7 -0.2	< 0.2
3 - 6		> 1.2	1.2 -0.3	< 0.3
6 - 12		> 1.9	1.9 -0.5	< 0.5
12- 20		> 2.9	2.9 -1.3	< 1.3
20- 40		> 5.0	5.0 -2.9	< 2.9
Ειδική τοξικότητα ιόντων				
Νάτριο (Na)				
Επιφανειακή άρδευση (προσρόφηση δια των ριζών)	SAR	< 3	3 -9	> 9
Καταιονισμός (προσρόφηση δια των φύλλων)	mg/l	≤ 70	> 70	
Χλωρίοντα (Cl)				
Επιφανειακή άρδευση (προσρόφηση δια των ριζών)	mg/l	< 140	140 -350	> 350

Καταιονισμός (προσρόφηση των φύλλων)	δια	mg/l	≤ 100	> 100	
Άλλες επιπτώσεις					
Άζωτο (NO ₃ -N) ⁽³⁾		mg/l	< 5	5 -30	> 30
HCO ₃ (μόνο για άρδευση για καταιονισμό)		mg/l	< 90	90-500	> 500
Ph Τυπικό διάστημα 6.5-8.5					

¹ECw ηλεκτρική αγωγιμότητα σε deciSiemens ανα μέτρο στους 25°C

²SAR βαθμός απορρόφησης νατρίου

³NO₃-N νιτρικό άζωτο σε όρους αζώτου

Η ελάχιστη συχνότητα δειγματοληψιών και αναλύσεων για τις παραμέτρους του Πίνακα 5 καθορίζεται σε 2 ανά έτος για ανακτημένα υγρά απόβλητα από εγκαταστάσεις επεξεργασίας με ισοδύναμο πληθυσμό μεγαλύτερο από 10,000 κατοίκους και σε 1 ανά έτος για τις υπόλοιπες περιπτώσεις.

Επισημαίνεται ότι τα όρια του Πίνακα 5 είναι ενδεικτικά και επιθυμητά χωρίς να είναι επιτακτικά και η ισχύς τους θα καθορίζεται κατά περίπτωση σε συνάρτηση με την ενδεχόμενη ανάμιξη των ανακτημένων υγρών αποβλήτων μεκαθαρά νερά, το είδος της καλλιέργειας, τα χαρακτηριστικά του εδάφους, τις κλιματικές συνθήκες, τον εξοπλισμό άρδευσης και άλλα στοιχεία της μελέτης άρδευσης.

Στην Ελλάδα, στις πειραματικές εγκαταστάσεις του ΕΘ.Ι.ΑΓ.Ε. στη Θεσσαλονίκη, χρησιμοποιήθηκαν επεξεργασμένα υγρά απόβλητα τόσο από τις δεξαμενές σταθεροποίησης, όσο και από τη συμβατική Μονάδα Βιολογικού Καθαρισμού Θεσσαλονίκης. Αρδεύτηκαν σε φυσικό έδαφος και σε σύστημα υδροπονίας, μη εδώδιμες καλλιέργειες, όπως ζέρμπερες, αλλά και ευαίσθητες εδώδιμες καλλιέργειες, όπως πιπεριές και τομάτες. Επίσης, έγινε επαναχρησιμοποίηση των επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων σε καλλιέργειες ζαχαρότευτλων, βαμβακιού και ρυζιού, με ή χωρίς λίπανση, οι οποίες έδωσαν εντυπωσιακά αποτελέσματα όσον αφορά τη βελτίωση της ποιότητας και ποσότητας των παραγομένων προϊόντων, καθώς και την εξοικονόμηση νερού και χημικών λιπασμάτων (Παπαδόπουλος & Παρισόπουλος, 2001).

2.2.2 Κανονισμός (ΕΕ) 2020/741 του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 25ης Μαΐου 2020

Η ξηρασία και η υποβάθμιση της ποιότητας των υδάτων, καθώς και η ευρύτερη κλιματική αλλαγή οδήγησαν στην ανάγκη δημιουργίας ενός ενιαίου κανονιστικού πλαισίου περί επαναχρησιμοποίησης λυμάτων για όλα τα Κράτη Μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Έτσι λοιπόν, το Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο και το Συμβούλιο της Ευρωπαϊκής Ένωσης εξέδωσαν τον κανονισμό 2020/741 σχετικά με τις ελάχιστες απαιτήσεις για την επαναχρησιμοποίηση των υδάτων, την 25η Μαΐου 2020. Κύριος στόχος του κανονισμού είναι η διασφάλιση ποιότητας του ανακτημένου νερού ώστε να είναι ασφαλές για γεωργική άρδευση, το οποίο εξασφαλίζει ταυτόχρονα και την προστασία του περιβάλλοντος και της δημόσιας υγείας. Ο κανονισμός οριοθετεί τις ελάχιστες απαιτήσεις για την ποιότητα και την παρακολούθηση των υδάτων και θεσπίζει διατάξεις για τη διαχείριση κινδύνου και την ασφαλή χρήση ανακτημένου νερού στο πλαίσιο της ολοκληρωμένης διαχείρισης υδάτων. Η επαναχρησιμοποίηση του νερού για άρδευση προωθεί την κυκλική οικονομία και συμβάλλει στην επίτευξη των Στόχων Βιώσιμης Ανάπτυξης που περιλαμβάνονται στην Ατζέντα των Ηνωμένων Εθνών για βιώσιμη ανάπτυξη έως το 2030. Η εφαρμογή του Κανονισμού ξεκινάει από τις 26 Ιουνίου 2023. Στις 5 Αυγούστου 2022, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή ανακοίνωσε κατευθυντήριες γραμμές για τη στήριξη της εφαρμογής του Κανονισμού 2020/741, στις οποίες επεξηγεί ενδελεχώς τα άρθρα του Κανονισμού.

Τα κράτη μέλη μπορούν να χρησιμοποιούν το ανακτημένο νερό και για περαιτέρω χρήσεις εκτός της άρδευσης, όπως για επαναχρησιμοποίηση βιομηχανικών υδάτων και για σκοπούς περιβαλλοντικούς και σκοπούς αναψυχής, με την επιφύλαξη του σχετικού ενωσιακού δικαίου της Ένωσης. Σύμφωνα με τον Κανονισμό, τα αστικά λύματα, εκτός της επεξεργασίας που αναφέρεται στην Οδηγία 91/271/ΕΟΚ, πρέπει να επεξεργάζονται περισσότερο προκειμένου να είναι κατάλληλα για άρδευση. Επιπλέον, θεσπίζονται ενιαίες ελάχιστες απαιτήσεις παρακολούθησης, κανόνες διαχείρισης κινδύνου, υποχρεώσεις αδειοδότησης και κανόνες διαφάνειας για την δημοσιοποίηση βασικών πληροφοριών των έργων επαναχρησιμοποίησης νερού. Κάθε κράτος μέλος πρέπει να λαμβάνει υπόψη του τις κλιματικές συνθήκες της χώρας του, τις εναλλακτικές πηγές νερού που υπάρχουν και παράλληλα την κατάσταση των επιφανειακών και υπόγειων υδάτων του, προκειμένου να καταλήξει στο αν η επαναχρησιμοποίηση λυμάτων αποτελεί μια οικονομικά συμφέρουσα πρακτική.

Αναλυτικότερα, ως γεωργική άρδευση ορίζεται, όπως ακριβώς αναφέρεται στον Κανονισμό, η άρδευση των ακόλουθων τύπων καλλιεργειών (Ευρωπαϊκή Επιτροπή (2020), *Κανονισμός 2020/741 της 25ης Μαΐου 2020*) :

- i. Καλλιέργειες εδώδιμων φυτών που καταναλώνονται ωμά, δηλαδή καλλιέργειες για κατανάλωση από τον άνθρωπο ωμές ή μη επεξεργασμένες,
- ii. Καλλιέργειες εδώδιμων φυτών που μεταποιούνται, δηλαδή καλλιέργειες που προορίζονται για ανθρώπινη κατανάλωση μετά από επεξεργασία (π.χ. μαγείρεμα ή βιομηχανική μεταποίηση),
- iii. Καλλιέργειες μη εδώδιμων φυτών, δηλαδή καλλιέργειες που δεν προορίζονται για κατανάλωση από τον άνθρωπο (π.χ. βοσκότοποι και χορτονομή, φυτά για παραγωγή ινών, διακοσμητικά φυτά, σπόροι προς σπορά, ενεργειακές καλλιέργειες και χλοοτάπητες)

Πίνακας 6: κατηγορίες ποιότητας του ανακτημένου νερού, επιτρεπόμενη γεωργική χρήση και μέθοδος άρδευσης.

Ελάχιστη κατηγορία ποιότητας του ανακτημένου νερού	Κατηγορία καλλιέργειας (*)	Μέθοδοι άρδευσης
A	Όλες οι κατηγορίες εδώδιμων φυτών που καταναλώνονται ωμά των οποίων το βρώσιμο τμήμα έρχεται σε άμεση επαφή με ανακτημένο νερό και τα ριζώδη φυτά που καταναλώνονται ωμά	Όλες οι μέθοδοι άρδευσης
B	Καλλιέργειες εδώδιμων φυτών που καταναλώνονται ωμά όταν το βρώσιμο μέρος παράγεται πάνω από το έδαφος και δεν βρίσκεται σε άμεση επαφή με ανακτημένο νερό, καλλιέργειες εδώδιμων φυτών που μεταποιούνται και καλλιέργειες μη εδώδιμων φυτών, συμπεριλαμβανομένων των καλλιεργειών που χρησιμοποιούνται για τη διατροφή γαλακτοπαραγωγικών ζώων που παράγουν κρέας	Όλες οι μέθοδοι άρδευσης
Γ	Καλλιέργειες εδώδιμων φυτών που καταναλώνονται ωμά όταν το βρώσιμο μέρος παράγεται πάνω από το έδαφος και δεν βρίσκεται σε άμεση επαφή με ανακτημένο νερό, καλλιέργειες εδώδιμων φυτών που μεταποιούνται και καλλιέργειες μη εδώδιμων φυτών, συμπεριλαμβανομένων των καλλιεργειών που χρησιμοποιούνται για τη διατροφή γαλακτοπαραγωγικών ζώων που παράγουν κρέας	Στάγδην άρδευση(**) ή άλλη μέθοδος άρδευσης που αποφεύγει την άμεση επαφή με το βρώσιμο μέρος της καλλιέργειας
Δ	Βιομηχανικές και ενεργειακές καλλιέργειες και καλλιέργειες σπόρων	Όλες οι μέθοδοι άρδευσης (***)

(*) Εάν ο ίδιος τύπος αρδευόμενης καλλιέργειας εμπίπτει σε πολλαπλές κατηγορίες του πίνακα 6, ισχύουν οι απαιτήσεις της αυστηρότερης κατηγορίας.

(**) Στάγδην άρδευση είναι ένα σύστημα μικροάρδευσης φυτών με σταγόνες ή μικρά ρυακία νερού και συνίσταται στην παροχή νερού σε σταγόνες πάνω στο έδαφος ή απευθείας κάτω από την επιφάνειά του σε πολύ χαμηλές ροές (2-20 λίτρα/ώρα) μέσω ενός συστήματος πλαστικών σωλήνων μικρής διαμέτρου στο οποίο προσαρμόζονται εκροές που ονομάζονται σταλάκτες.

(***) Στις περιπτώσεις μεθόδων άρδευσης τεχνητής βροχής, θα πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στην προστασία της υγείας των εργαζομένων ή των παρευρισκομένων. Για τον σκοπό αυτό, εφαρμόζονται κατάλληλα προληπτικά μέτρα.

Πίνακας 7: Απαιτήσεις ποιότητας ανακτημένου νερού κατηγορίας Α,Β,Γ,Δ του Κανονισμού 2020/741 (Πηγή: Κανονισμός 2020/741, 2020)

	E. Coli (EC/100ml)	BOD₅ (mg/l)	SS (mg/l)	Θολότητα (NTU)	Απαιτούμενη επεξεργασία
Κανονισμός Κατηγορία Α	≤10 για το 90% των δειγμάτων	≤10 για το 90% των δειγμάτων	≤10 για το 90% των δειγμάτων	≤5 για το 90% των δειγμάτων	Δευτεροβάθμια, Τριτοβάθμια επεξεργασία και Απολύμανση
Κανονισμός Κατηγορίες Β, Γ, Δ	B: ≤100 Γ: ≤1.000 Δ: ≤10.000 για το 90% των δειγμάτων	B: ≤25 Γ: ≤25 Δ: ≤25	B: ≤35 Γ: ≤35 Δ: ≤35	-	Δευτεροβάθμια επεξεργασία και Απολύμανση

2.2.3 Κριτήρια του Παγκόσμιου Οργανισμού Υγείας

Το 1989 Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας εξέδωσε την Τεχνική Αναφορά Νο 778 (W.H.O., 1989) τα μικροβιολογικά κριτήρια της οποίας καθώς και ο απαιτούμενος βαθμός επεξεργασίας για την επίτευξη των συνιστώμενων ορίων δίνονται στον Πίνακα 8 (W.H.O., 1989).

Όσον αφορά τα κολοβακτηρίδια εντερικής προέλευσης, για άρδευση καλλιεργειών χωρίς περιορισμούς θεωρείται ότι η συγκέντρωση των 1000EC/100 mL είναι τεχνολογικά εφικτή. Επίσης, στις περιπτώσεις όπου η μόνη εκτιθέμενη ομάδα είναι οι γεωργοί δεν τίθεται όριο μικροβιακού φορτίου. Ανεξάρτητα όμως από τη χρήση του νερού, κάποια μείωση του βακτηριακού φορτίου είναι επιθυμητή. Η φυσική θανάτωση των παθογόνων εξαιτίας της δράσης της ηλιακής υπεριώδους ακτινοβολίας, της αφυδάτωσης και των φυσικών τους καταστροφών, κατά την εφαρμογή των αποβλήτων στα φυτά και το έδαφος, μπορεί να επιφέρουν επιπλέον μείωση του φορτίου παθογόνων κατά 90-99 % μερικές ημέρες μετά την εφαρμογή του νερού.

Η επιτρεπόμενη συγκέντρωση βακτηρίων εντερικής προέλευσης του Πίνακα 9 βρίσκεται μέσα στα όρια που αποδέχονται πολλές χώρες για τα νερά των ποταμών που χρησιμοποιούνται για χωρίς περιορισμούς άρδευση, δίχως να παρατηρηθούν συνέπειες.

Πίνακας 8: Εκτίμηση της ποιότητας των αρδευτικών νερών

Παράμετρος του νερού	Σύμβολο	Μονάδες	Συνήθεις τιμές στο αρδευτικό νερό
<i>Περιεχόμενα άλατα</i>			
Ηλεκτρική αγωγιμότητα	EC _w	mmhos/cm ή dS/m ^α	0-3
Ολικά διαλυμένα στερεά	T.D.S.	mg/L	0-2000
Θερμοκρασία	T	°C	
Χρώμα-Θολότητα		NTU/JTU ^β	
Σκληρότητα		mg/L eq. CaCO ₃ /L	

Ιζήματα		g/L	
Κατιόντα και ανιόντα			
Ασβέστιο	Ca ⁺⁺	mg/L	0-400
Μαγνήσιο	Mg ⁺⁺	mg/L	0-60
Νάτριο	Na ⁺	mg/L	0-900
Ανθρακικά	CO ₃ ⁻	mg/L	0-3
Όξινα ανθρακικά	HCO ₃ ⁻	mg/L	0-600
Χλωριούχα	Cl ⁻	mg/L	0-1100
Θειικά	SO ₄ ⁻	mg/L	0-1000
Βόριο	B	mg/L	0-2
Οξύτητα/Αλκαλικότητα			6,5-8,5
% προσρόφησης Na	SAR	(me/L) ^α	0-15
Ιχνοστοιχεία		mg/L	
Βαρέα μέταλλα		mg/L	
Κάδμιο	Cd	mg/L	
Χαλκός	Cu	mg/L	
Σίδηρος	Fe	mg/L	
Μόλυβδος	Pb	mg/L	
Μαγγάνιο	Mn	mg/L	
Νικέλιο	Ni	mg/L	
Ψευδάργυρος	Zn	mg/L	
Νιτρικό N	NO ₃ -N	mg/L	0-10
Αμμωνιακό N	NH ₄ -N	mg/L	
Φωσφορικός P	PO ₄ -P	mg/L	0-2
Κάλιο	K	mg/L	0-2

Πηγή : Ayers and Westcot (1985), Kandiah (1990).

^α dS/m = deciSiemen/m = mmho/cm

^β NTU/JTU = Nephelometric Turbidity Units/Jackson Turbidity Units

Πίνακας 9: Μικροβιολογικά κριτήρια επαναχρησιμοποίησης των αστικών υγρών αποβλήτων, που συνιστώνται για άρδευση από τον W.H.O.^α

Κατηγορία	Συνθήκες επαναχρησιμοποίησης	Εκτιθέμενη ομάδα	Εντερικοί νηματώδεις ^β (αριθ. Μέσος αρ. αυγών/Ε) ^γ	Κολοβακτηρίδια Εντερικής προέλευσης	Επεξεργασία των αστικών αποβλήτων, που αναμένεται να δώσει την επιθυμητή μικροβιολογική ποιότητα
A	Άρδευση καλλιεργειών που καταναλώνονται νωπές, γήπεδα Αθλοπαιδιών και πάρκων αναψυχής ^δ	Αγρότες Καταναλωτές κοινό	≤1	≤1000	Μια σειρά δεξαμενών σταθεροποίησης σχεδιασμένων για να πετυχαίνουν την επιθυμητή μικροβιολογική ποιότητα, ή ισοδύναμη μεταχείριση.

Β	Άρδευση δημητριακών, βιομηχανικών φυτών, βοσκών και δένδρων ^ε	Αγρότες	≤1	Δε συνιστάται κάποιο όριο	Παραμονή σε δεξαμενές σταθεροποίησης για 8-10 ημέρες, ή ισοδύναμη απομάκρυνση ελμίνθων και κολοβακτηριδίων εντερικής προέλευσης.
Γ	Τοπική άρδευση Καλλιεργειών της κατηγορίας Β, όταν δε συμβαίνει έκθεση αγροτών και κοινού	Καμία	Δεν τίθεται όριο	Δεν τίθεται όριο	Προεπεξεργασία όπως απαιτείται από το σύστημα άρδευσης, αλλά όχι λιγότερο από πρωτοβάθμια καθίζηση.

^α Σε ειδικές περιπτώσεις, τοπικοί επιδημιολόγοι, κοινωνικοπολιτικοί και περιβαλλοντικοί παράγοντες πρέπει να λαμβάνονται υπόψη και οι οδηγίες να προσαρμόζονται κατάλληλα.

^β Είδη *Ascaris* και *Trichuris* και νηματοσκώληκες.

^γ Κατά τη διάρκεια της αρδευτικής περιόδου.

^δ Μία πιο αυστηρή οδηγία (< 200 κολοβακτηρίδια εντερικής προέλευσης ανά 100 mL) είναι κατάλληλη για κοινόχρηστες επιφάνειες πρασίνου, όπου το κοινό έρχεται σε άμεση επαφή με την αρδευόμενη επιφάνεια.

^ε Στην περίπτωση των οπωροφόρων δένδρων, τα φρούτα των οποίων καταναλώνονται αμέσως μετά την κοπή, τελευταία άρδευση πρέπει να γίνεται δύο εβδομάδες πριν τη συγκομιδή και δεν πρέπει να συλλέγονται φρούτα από το έδαφος. Άρδευση με καταιονισμό δεν πρέπει να χρησιμοποιείται.

Πίνακας 10: Συνιστώμενες οδηγίες για επαναχρησιμοποίηση νερού στην περιοχή της Μεσογείου

Κατηγορία νερού	Κριτήρια Ποιότητας			Επεξεργασία λυμάτων
	Μικροβιολογικά		Φυσικο-Χημικά	
	Εντερικοί νηματώδεις ^α (Αυγά/λίτρο)	Κολοβακτηρ ιδία ^β ή <i>E. coli</i> (cfii/100 mL)	SS ^γ (mg/L)	
Κατηγορία I				
A) Οικιστική επαναχρησιμοποίηση (άρδευση ιδιωτικών κήπων, πλύσιμο μηχανών κλπ) B) Αστική χρήση (άρδευση πάρκων, καθαρισμός οδών, πυρόσβεση κλπ.) Γ) Χρήση σε αρχιτεκτονική τοπίου και χώρους αναψυχής (λίμνες κλπ.)	≤0,1 ^η	≤ 200 ^δ	≤ 10	Δευτεροβάθμια επεξεργασία +φιλτράρισμα, +απολύμανση
Κατηγορία II				

A) Άρδευση λαχανικών, ζωοτροφών, οπωρώνων κλπ. B) Πλήρωση υδροφόρων στρωμάτων	≤ 0,1 ^η	≤ 1000 ^δ	≤20 ≤150 ^{στ}	Δευτεροβάθμια επεξεργασία ή ισοδύναμη ^ζ +φιλτράρισμα+ απολύμανση Ή Δευτεροβάθμια επεξεργασία. ή ισοδ. +αποθήκευση, δεξαμενές ωρίμανσης
Γ) Βιομηχανική χρήση	-			
Κατηγορία III				
Άρδευση δημητριακών και ελαιοδοτικών φυτών, κλωστικών φυτών, φυτωρίων, δασών οπωρώνων ^ε κλπ.	≤1	Δεν απαιτείται	≤35 ≤150 ^{στ}	Δευτεροβάθμια επεξεργασία ή ισοδύναμη ^ζ + λίγες ημέρες αποθήκευση Ή Σύστημα αερόβιων δεξαμενών
Κατηγορία IV				
A) Άρδευση λαχανικών με επιφ. και υπόγεια στάγδην άρδευση χωρίς επαφή αποβλήτων και εδώδιμου μέρους φυτών B) Άρδευση φυτών κατ. III με σταλακτήρες Γ) Άρδευση πάρκων που δεν είναι προσβάσιμοι στο κοινό με επιφανειακούς σταλακτήρες Δ) Άρδευση πάρκων, γηπέδων γκολφ, αθλητικών χώρων με υπόγεια στάγδην άρδευση.	Δεν απαιτείται	Δεν απαιτείται	Προεπεξεργασία όπως απαιτείται αλλά όχι λιγότερη από την πρωτοβάθμια καθίζηση	

^α Είδη *Ascaris* και *Trichuris* και Αγκυλόστομα (Επίσης για προστασία από παρασιτικά πρωτόζωα).

^β Κοπρώδη κολοβακτηρίδια *Escherichia coli* (cfu : colony forming units-μονάδες σχηματισμού αποικιών).

^γ SS : Αιωρούμενα στερεά.

^δ Οι τιμές πρέπει να διαμορφώνονται στο 80 % των δειγμάτων ανά μήνα, ελάχιστος αριθμών δειγμάτων 5.

^ε Στην περίπτωση οπωρώνων, η άρδευση πρέπει να σταματά δύο εβδομάδες πριν τη συγκομιδή και κανένα φρούτο δεν πρέπει να συγκομίζεται από το έδαφος. Δεν πρέπει να χρησιμοποιείται καταιονισμός.

^{στ} Δεξαμενές σταθεροποίησης.

^ζ Όπως προχωρημένη πρωτοβάθμια επεξεργασία (Jimenez et al., 1999 και 2001).

^η Καθώς πολύ λίγες εξετάσεις έχουν γίνει για το όριο <0,1 αυγά νηματωδών/λίτρο, συνήθως αντικαθίσταται από το <1 αυγά νηματωδών/λίτρο.

Σε πολλές χώρες ανά τον κόσμο, τα υγρά απόβλητα και κυρίως αυτά που έχουν υποστεί δευτερογενή επεξεργασία χρησιμοποιούνται για άρδευση. Αποτελούν, λοιπόν, έναν πολύ οικονομικό υδατικό πόρο για γεωργική χρήση στη Γαλλία, στην Κύπρο, στην Ισπανία, στο Ισραήλ, στην Ιταλία και σε άλλες χώρες. Πιο αναλυτικά:

Η Κύπρος θεωρείται πρωτοπόρος χώρα παγκοσμίως ως προς την επαναχρησιμοποίηση λυμάτων, ως αποτέλεσμα των έντονων και συνεχόμενων ξηρασιών. Είναι αποδεδειγμένα η χώρα με το υψηλότερο ποσοστό υδατικής πίεσης στην Ευρωπαϊκή Ένωση. Το κλίμα της είναι ξηρό και θερμό και σε συνδυασμό με τη μεγάλη τουριστική ανάπτυξη προκύπτει η ζήτηση νερού να είναι μεγαλύτερη από την προσφορά. Ο Νόμος περί της Ενιαίας Διαχείρισης Υδάτων (79(I)/2010) θεσπίστηκε για την αντιμετώπιση της έλλειψης νερού, την κατανομή του σε οικιακές, γεωργικές, βιομηχανικές και άλλες χρήσεις, την ανάθεση αρμοδιοτήτων και στην συνέχεια τροποποιήθηκε αρκετές φορές με τον τελευταίο να είναι ο Νόμος 10(I)/2022. Σύμφωνα με το Τμήμα Αναπτύξεως Υδάτων της Κύπρου, το 2020 το ανακυκλωμένο νερό έφτασε τα 22.000.000 m³ ενώ το 2019 είχε φτάσει τα 24.000.000 m³. Το 80% του νερού αυτού παράγεται από αστικούς οικισμούς όπως για παράδειγμα από την Λάρνακα, Πάφο, Λεμεσό και Λευκωσία. Ο υδροφορέας Έζουσα στην Πάφο, από το 2004, επαναφορτίζεται τεχνητά με επεξεργασμένα λύματα σε συνδυασμό με νερό από το φράγμα Ασπρόκρεμμου προκειμένου να αποφευχθεί η υφαλμύριση του υπόγειου υδροφορέα (Sofroniou, 2021).

Η Ισπανία, ως μια χώρα με συνεχώς αυξανόμενο τουρισμό αλλά και περιοδικές ξηρασίες, αντιμετώπιζε σοβαρό πρόβλημα λειψυδρίας με αποτέλεσμα η επαναχρησιμοποίηση επεξεργασμένου νερού να αποτελεί μονόδρομο. Σύμφωνα με το Ισπανικό Υπουργείο Περιβάλλοντος το 2014-2015 ο όγκος του επαναχρησιμοποιημένου νερού έφτασε τα 500 εκατομμύρια m³/χρόνο, καθιστώντας την χώρα στην πρώτη θέση της Ευρωπαϊκής Ένωσης σε ποσότητα ανακτημένου νερού που επαναχρησιμοποιείται. Το 2018 ο όγκος έφτασε στα 1200 εκατομμύρια m³/χρόνο (Echevarría et al., 2022). Στην παράκτια περιοχή Costa Brava της επαρχίας Girona στην βορειοανατολική Ισπανία δημιουργήθηκε το 1971 ο οργανισμός νερού " The Consorci de la Costa Brava", ο οποίος είχε στόχο την διαχείριση ολόκληρου του κύκλου νερού. Η περιοχή με μόνιμο πληθυσμό περίπου 150.000 κατοίκους, το καλοκαίρι ξεπερνάει το 1 εκατομμύριο μαζί με τους τουρίστες. Ο οργανισμός εξειδικεύεται, από το 1989, στην ανάκτηση και επαναχρησιμοποίηση επεξεργασμένων λυμάτων για μη πόσιμους σκοπούς με αποτέλεσμα το 2010 να παράγει 6.4 εκατομμύρια m³/έτος σε 14 εγκαταστάσεις επεξεργασίας.

Η Γαλλία αποτελεί μια χώρα με πλούσια ιστορία στον τομέα της επαναχρησιμοποίησης ανακτημένου νερού καθώς ήταν από τις πρώτες χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης που εφάρμοσε αντίστοιχες τεχνικές. Η νομοθεσία που διέπει αυτές τις τεχνικές είναι το Διάταγμα στις 2 Αυγούστου 2010 σχετικά με τη χρήση νερού από την επεξεργασία αστικών λυμάτων για την άρδευση καλλιεργειών ή χώρων πρασίνου και στη συνέχεια η τροποποίησή του με το Διάταγμα στις 25 Ιουνίου 2014. Εξειδικεύεται στην επαναχρησιμοποίηση νερού συγκεκριμένα για αρδευτικούς σκοπούς. Τα επεξεργασμένα λύματα προέρχονται από μονάδες επεξεργασίας αστικών λυμάτων με έντονη οργανική ρύπανση και επιτρέπεται να χρησιμοποιηθούν για τρόφιμα που προορίζονται για ανθρώπινη κατανάλωση και καταναλώνονται ωμά, για κατανάλωση μετά από θερμική επεξεργασία αλλά και για χώρους αναψυχής. Η ιλύς των επεξεργασμένων λυμάτων πρέπει να τηρεί συγκεκριμένες οριακές τιμές οι οποίες καθορίζονται από τη γαλλική νομοθεσία για τη γεωργική χρήση της λάσπης. Η γαλλική νομοθεσία, διαχωρίζει κατηγορίες ποιότητας νερού (Α,Β,Γ,Δ) και αντίστοιχα οριοθετεί τις παραμέτρους. Τα επεξεργασμένα λύματα ταξινομούνται στο επίπεδο ποιότητας που αντιστοιχεί στην πιο δυσμενή παράμετρο.

Το Ισραήλ είναι πρωτοπόρο παγκόσμιο επίπεδο στη χρήση του ανακτημένου νερού, καθώς επαναχρησιμοποιείται το 75% των δημοτικών λυμάτων για άρδευση. Η ανάκτηση νερού, λοιπόν, είναι ιδιαίτερα σημαντική τόσο στο Ισραήλ όσο και στην Παλαιστίνη και για αυτό

συστάθηκε η Παλαιστινιακή Αρχή Υδάτων (PWA), η οποία είναι υπεύθυνη για την επεξεργασία και την επαναχρησιμοποίηση λυμάτων.

Η Ιταλία αντιμετωπίζει μεγάλο πρόβλημα ξηρασίας στο νότιο τμήμα της. Στη χώρα λειτουργούν 3691 εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων και επαναχρησιμοποιούνται περίπου 240 εκατομμύρια m³ επεξεργασμένου νερού/έτος (Water Reuse – Legislative Framework in EU Regions, 2018). Περιοχές της Ιταλίας που χαρακτηρίζονται από έντονη αστικοποίηση και εντατική γεωργική δραστηριότητα, όπως για παράδειγμα Λομβαρδία και Emilia-Romagna, και παράκτιες περιοχές με ξηρό κλίμα, όπως Σαρδηνία, Απουλία (Puglia) και Τοσκάνη, έχουν συμβάλει σημαντικά στη δημιουργία βέλτιστων πρακτικών στην επαναχρησιμοποίηση των λυμάτων. Στην περιοχή της Emilia-Romagna επεξεργάζονται 450.000 m³ νερού/έτος, τα οποία χρησιμοποιούνται για άρδευση περίπου 2.500 στρεμμάτων καλλιεργιών. Επιπλέον στην πόλη Mancasale, μέσω του πιλοτικού έργου ReQpro, αναπτύχθηκε ένα μοντέλο επαναχρησιμοποίησης με στόχο την ανάκτηση νερού υψηλής ποιότητας για άρδευση λαχανικών. Τα αποτελέσματα του έργου έδειξαν ότι περίπου το 65% των επεξεργασμένων λυμάτων χρησιμοποιήθηκε επιτυχώς για άρδευση. Στο Μιλάνο, η Εγκατάσταση Επεξεργασίας Λυμάτων Nosedo είναι η μεγαλύτερη στην Ευρώπη, επεξεργάζεται 150.000.000 m³ λυμάτων/έτος και αρδεύει περίπου 40.000 στρέμματα καλλιεργιών καλαμποκιού, ρυζιού, σιτηρών και εκτάσεις με γρασίδι.

Ειδικότερα, η Γαλλία είναι μια από τις πρώτες χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης που κατασκεύασε και έθεσε σε λειτουργία έργα επαναχρησιμοποίησης νερού την δεκαετία του 1990. Οι σταθμοί επεξεργασίας λυμάτων αρδεύουν περισσότερα από 30.000 στρέμματα γης με διαφορετικές καλλιέργειες, όπως για παράδειγμα κηπουρικά φυτά, οπωρολαχανικά, δημητριακά, δάση, λιβάδια και γήπεδα γκολφ. Το πιο γνωστό έργο επαναχρησιμοποίησης λειτουργεί από το 1996 στην περιοχή Clermont-Ferrand, όπου ένα εργοστάσιο επεξεργασίας ζάχαρης ποτίζει 14.000 στρέμματα φάρμας με καλλιέργειες κυρίως καλαμποκιού και παντζαριού. Κατά την διάρκεια του χειμώνα, τα λύματα από το εργοστάσιο της ζάχαρης διοχετεύονται σε γεωργικές εκτάσεις προκειμένου να τους παρέχουν όλα τα θρεπτικά συστατικά τους και στη συνέχεια το καλοκαίρι χρησιμοποιούνται για την άρδευση των καλλιεργειών. Την άνοιξη και το φθινόπωρο, το νερό μεταφέρεται σε λιμνοθάλασσες που διαθέτει το εργοστάσιο, όπου γίνεται η τριτοβάθμια επεξεργασία και η αποθήκευση του (Declercq et al., 2015)

Είναι αξιοσημείωτο, ότι η Κύπρος και η Μάλτα είναι οι μόνες χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης που έχει επισήμως γίνει αποδεκτό ότι αντιμετωπίζουν πρόβλημα λειψυδρίας, όπως επισημαίνεται στην Στρατηγική Μελέτη για τη Διαχείριση των Υδάτων και την Αντιμετώπιση της Ανομβρίας του Υπουργείου Γεωργίας Αγροτικής Ανάπτυξης και Περιβάλλοντος της Κύπρου το 2019. Η έντονη ξηρασία και η έλλειψη νερού στην Κύπρο, έχουν οδηγήσει στην πλήρη εφαρμογή των μεθόδων επαναχρησιμοποίησης νερού καθώς και την άμεση δημιουργία αντίστοιχων νομοθετικών διατάξεων την δεκαετία του '90. Υπάρχουν οκτώ μεγάλες εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων, οι οποίες χρησιμοποιούνται κυρίως για άρδευση γεωργικών και κτηνοτροφικών καλλιεργειών, χώρων πρασίνου και εμπλουτισμό υπόγειων υδροφορέων και διαθέτουν τριτοβάθμια επεξεργασία με φίλτρα άμμου και χλωρίωση ώστε να επιτυγχάνονται όσο το δυνατόν καλύτερα ποιοτικά χαρακτηριστικά. Σε αυτά τα έργα επαναχρησιμοποίησης αναλογεί το 1/5 του αναπτυξιακού προϋπολογισμού του Κράτους. Παρομοίως, και η Μάλτα αντιμετωπίζει τεράστιο πρόβλημα από την έλλειψη νερού με την κατανάλωση για οικιακή χρήση να ξεπερνάει το 50% των υφιστάμενων υδάτινων πόρων. Δεδομένου ότι η γεωργία είναι η κύρια πηγή εσόδων του κράτους, η

επαναχρησιμοποίηση των λυμάτων για άρδευση είχε εξεταστεί ήδη από το 1884, προκειμένου να διατηρηθεί το γλυκό νερό για οικιακή χρήση μόνο. Από το 1983, τα επεξεργασμένα λύματα από την μονάδα επεξεργασίας λυμάτων Sant'Antnin χρησιμοποιήθηκαν για άρδευση. Σήμερα, το ποσοστό επαναχρησιμοποίησης λυμάτων στην Μάλτα αγγίζει το 60%.

Θα πρέπει να τονιστεί ότι τα όρια του Π.Ο.Υ. είναι πολύ χαλαρά καθώς απευθύνονται και σε αναπτυσσόμενες χώρες. Τα κριτήρια που έχουν θεσπίσει αρκετές Ευρωπαϊκές χώρες όπως και ο Ευρωπαϊκός κανονισμός έχουν πολύ αυστηρότητα όρια.

Ενώ τα κριτήρια του W.H.O. για άρδευση χωρίς περιορισμούς είναι λιγότερα από 200/100 mL κολοβακτηρίδια εντερικής προέλευσης, άλλα κριτήρια σε διάφορα μέρη του κόσμου είναι πιο αυστηρά.

Κατά τη θέσπιση κριτηρίων για τη μικροβιακή ποιότητα των αποβλήτων που προορίζονται για άρδευση καλλιεργειών γίνεται μια προσπάθεια συμβιβασμού του θεωρητικά επιθυμητού και ασφαλούς για τη δημόσια υγεία με εκείνο που είναι πρακτικά εφικτό. Όρια πολύ αυστηρά θα μπορούσαν να αποκλείσουν τη χρήση του νερού αυτού, με αποτέλεσμα την απώλεια μιας πολύτιμης πηγής νερού.

Δυνητικά, υπάρχουν κάποιοι κίνδυνοι υγείας που συνδέονται με τη χρήση των υγρών αποβλήτων στην άρδευση. Στην πράξη όμως, οι κίνδυνοι ίσως δεν είναι τόσο σοβαροί, όσο δείχνουν οι επιδημιολογικές έρευνες. Αυτή η θέση δεν αναφέρεται βέβαια στις παραβιάσεις βασικών κανόνων υγιεινής, όπως η άρδευση λαχανικών που καταναλώνονται νωπά με, ανεπαρκώς ανεπεξέργαστα, επεξεργασμένα αστικά απόβλητα (Bouwer and Idelovitch, 1987).

2.3 Αξιολόγηση της ποιότητας των υγρών αποβλήτων προς άρδευση

Η καταλληλότητα του νερού για άρδευση των καλλιεργειών εξαρτάται σε σημαντικό βαθμό από τις κλιματικές συνθήκες, τις φυσικές και χημικές ιδιότητες του εδάφους, την αντοχή των καλλιεργειών στην αλατότητα και στην τοξική δράση ορισμένων στοιχείων καθώς και τις πρακτικές διαχείρισης. Σε ότι αφορά την εκτίμηση της καταλληλότητας των επεξεργασμένων αστικών αποβλήτων για την άρδευση των καλλιεργειών, συνιστάται χρήση της ποιοτικής κατάταξης των Ayers and Westcot (1985), η οποία είναι πλέον περιεκτική. Οι Ayers and Westcot (1985) κατέταξαν το νερό άρδευσης σε τρεις κατηγορίες ανάλογα με τα προβλήματα που είναι δυνατό να προκύψουν όπως, αλάτωση του εδάφους, μείωση της διηθητικότητας του εδάφους, τοξικές επιδράσεις στα φυτά και διάφοροι άλλοι κίνδυνοι, όπως φαίνεται στον Πίνακα 10.

Πίνακας 11: Κριτήρια ποιοτικής κατάταξης του αρδευτικού νερού

Ενδεχόμενο πρόβλημα από το νερό άρδευσης	Μονάδες	Βαθμός περιορισμού στη χρήση		
		Κανένας	Μικρός έως μέτριος	Μεγάλος
Αλατότητα (Επηρεάζει τη διαθεσιμότητα του νερού στα φυτά)				
EC _w , 25 °C	dS/m	<0,7	0,7-3,0	>3,0
T.D.S.	mg/L	<450	450-2000	>2000
Διηθητικότητα (Επηρεάζει το ρυθμό διήθησης του νερού στο έδαφος. Εκτιμάται από το συνδυασμό των SAR και EC _w) ^α				
SAR = 0-3 και EC _w		>0,7	0,7-0,2	<0,2
3-6				<0,3
6-12				<0,5
12-20				<1,3
20-40				<2,9
Τοξικότητα ιόντων (Επηρεάζει τις αποδόσεις των ευαίσθητων φυτών)				
Νάτριο (Na)^{β,γ}				
Επιφανειακή άρδευση	me/L	<4	4-10	>10
	SAR ή adj. SAR	<3	3-9	>9
Καταιονισμός	me/L	<3	>3	
	mg/L	<69	>69	
Χλώριο (Cl)^{β,γ}				
Επιφανειακή άρδευση	me/L	<4	4-10	>10
	mg/L	<142	142-355	>355
Καταιονισμός	me/L	<3	>3	
	mg/L	<106	>106	
Βόριο (B)	mg/L	<0,7	0,7-3,0	>3,0
Διάφορες επιδράσεις (Αφορούν κυρίως ευπαθή φυτά)				
Αζωτο (Ολικό-N)^δ	mg/L	<5	5-30	>30
Όξινα ανθρακικά (HCO₃) (Μόνο για τον καταιονισμό)	me/L mg/L	<1,5	1,5-8,5	>8,5
		<90	90-520	>520

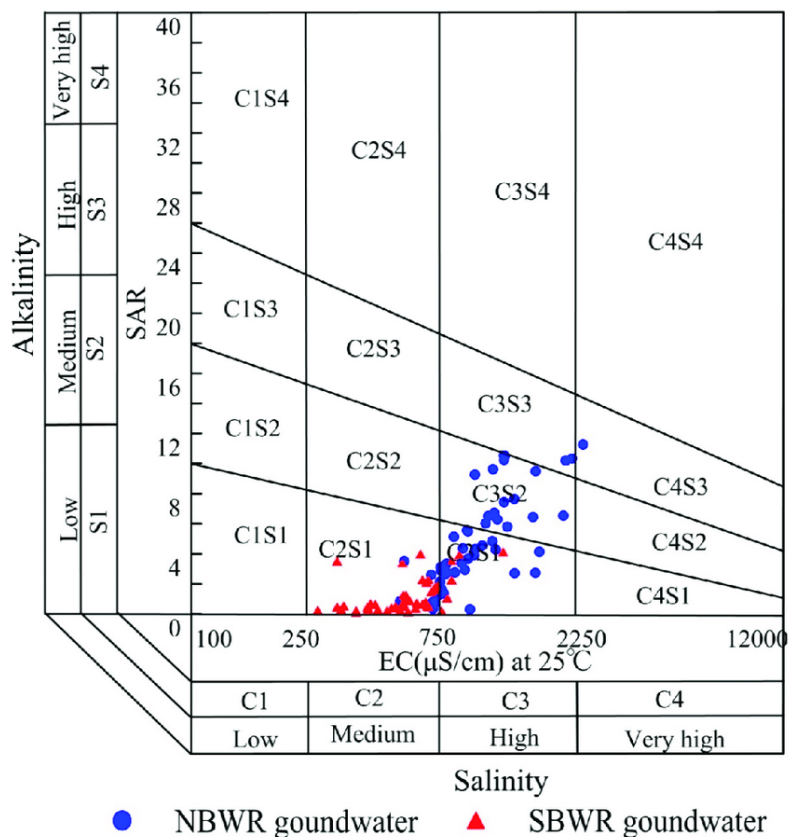
Υπολειμματικό χλώριο	mg/L	<1	1-5	>5
pH	Σύνηθες εύρος 6,5-8,5			

^α Για τα υγρά απόβλητα, συνιστάται χρήση του adj. SAR αντί του SAR. για να επιτυγχάνεται μία πιο σωστή εκτίμηση του ασβεστίου του εδαφικού νερού μετά την άρδευση.

^β Οι περισσότερες δενδρώδεις καλλιέργειες και τα ξυλώδη διακοσμητικά φυτά είναι ευαίσθητα στο νάτριο και το χλώριο. Οι περισσότερες ετήσιες καλλιέργειες δεν είναι ευαίσθητες.

^γ Όταν άρδευση γίνεται με καταιονισμό σε χαμηλή σχετική υγρασία (<30%) και οι συγκεντρώσεις νατρίου και χλωρίου είναι μεγαλύτερες από 70 και 100 mg/L αντίστοιχα, προκαλείται μεγάλη απορρόφηση αυτών από τα φύλλα των φυτών, με αποτέλεσμα τα ευαίσθητα φυτά να υφίστανται σημαντικές βλάβες.

^δ Στο ολικό άζωτο πρέπει να συμπεριλαμβάνεται το νιτρικό, το αμμωνιακό και το οργανικό άζωτο. Παρόλο που οι μορφές του αζώτου στα απόβλητα ποικίλουν, τα φυτά ανταποκρίνονται στο ολικό άζωτο.



Εικόνα 1: Διάγραμμα Wilcox για την αξιολόγηση της ποιότητας του αρδευτικού νερού (Xu et al., 2019)

2.4 Συνέπειες της άρδευσης με υγρά απόβλητα στο έδαφος και τα φυτά

2.4.1 Αλάτωση του εδάφους

Η αλατότητα, μετρούμενη με την ηλεκτρική αγωγιμότητα, είναι μια από τις πιο σημαντικές παραμέτρους για την εκτίμηση της καταλληλότητας του νερού άρδευσης, αφού συνδέεται άμεσα με τα πιθανά προβλήματα που προκαλεί η συνολική συγκέντρωση των αλάτων του νερού στο έδαφος και τα φυτά.

Τα άλατα συσσωρεύονται στο έδαφος με την εφαρμογή του αρδευτικού νερού και τα προβλήματα παρουσιάζονται όταν αυτά φθάσουν σε συγκεντρώσεις που είναι βλαβερές για το έδαφος και τα φυτά. Ο ρυθμός συσσώρευσης των αλάτων στο έδαφος εξαρτάται από το ποσό και το ρυθμό αποθήκευσης αυτών στο έδαφος με το αρδευτικό νερό και από το ρυθμό απομάκρυνσής τους με έκπλυση.

Για την εφαρμογή της έκπλυσης είναι απαραίτητο να υπάρχει καλή έως άριστη στράγγιση, ώστε να είναι δυνατή συνεχής ροή του νερού από τη ζώνη του ριζοστρώματος προς τα κάτω (Μισοπολινός 1991, Παπαζαφειρίου και Αντωνόπουλος 1991).

Γενικά, θεωρείται ότι κάτω από συνθήκες κανονικής άρδευσης ένα κλάσμα του νερού διηθείται βαθιά μέσα από τη ζώνη του ριζοστρώματος και απομακρύνει τα άλατα. Ο τύπος που δίνει το επιπλέον ποσό του νερού που χρειάζεται για την έκπλυση των αλάτων δίνεται από τη σχέση 1.1 (Τερζίδης και Παπαζαφειρίου 1997):

$$LR = \frac{EC_W}{3EC_{50}} \quad (1.1)$$

Όπου,

LR = Συντελεστής έκπλυσης

EC_W = Ηλεκτρική αγωγιμότητα αρδευτικού νερού dS/m

EC_{50} = Ηλεκτρική αγωγιμότητα εκχυλίσματος κορεσμού του εδάφους σε dS/m που αντιστοιχεί σε απόδοση 50 % (Maas and Hoffman 1977, Maas 1990).

Υπό αυτή την προϋπόθεση δεν αναμένεται να υπάρξει πρόβλημα αλατότητας για νερά με $EC_W < 0,7$ dS/m και δεν απαιτείται καμιά άλλη ιδιαίτερη πρακτική διαχείρισης. Για άρδευση με νερά ηλεκτρικής αγωγιμότητας από 0,7-3.0 dS/m πιθανώς να απαιτούνται ειδικές πρακτικές διαχείρισης ώστε να μην υπάρξει μείωση της παραγωγής. Νερά με ηλεκτρική αγωγιμότητα $EC_W > 3,0$ dS/m απαιτούν ιδιαίτερα δραστικά μέτρα και προσεκτική διαχείριση για να ελεγχθεί η αλατότητα. Τα μέτρα αυτά περιλαμβάνουν την επιλογή ανθεκτικών καλλιεργειών στα άλατα, σημαντική αύξηση της έκπλυσης και υψηλή διαθεσιμότητα εδαφικού νερού. Καλλιέργειες ευαίσθητες στα άλατα θα παρουσιάσουν σημαντικές μειώσεις στην παραγωγή όταν αρδεύονται με νερά με $EC_W > 3$ dS/m, ακόμα και κάτω από άριστες συνθήκες διαχείρισης.

Από σχετική εργασία (Mujeriego et al. 1996), αναφέρεται ότι η άρδευση γρασιδιού με επεξεργασμένα υγρά απόβλητα έδωσε αρχικά υψηλές τιμές SAR και EC στο έδαφος, οι οποίες μειώθηκαν στα επιτρεπόμενα όρια. Οι τιμές της EC σταθεροποιήθηκαν μεταξύ 1,2 και 1,5

dS/m μετά από 4 χρόνια άρδευσης. Επίσης, σε πείραμα άρδευσης βαμβακιού (Panoras et al., 2001) δεν παρατηρήθηκε επιβάρυνση του εδάφους όσον αφορά την αλατότητα από την άρδευση με επεξεργασμένα υγρά απόβλητα. Οι Yoon et al. (2001) παρατήρησαν μια μικρή συσσώρευση αλάτων σε ορυζώνα που αρδεύτηκε με επεξεργασμένα υγρά απόβλητα, χωρίς να υπάρξει αρνητική επίπτωση στην απόδοση της καλλιέργειας.

2.4.2 Διηθητικότητα του εδάφους

Η διηθητικότητα είναι μία φυσική παράμετρος κατά την οποία το διαθέσιμο νερό στην επιφάνεια του εδάφους διαπερνά την εδαφική στρώση. Η γνώση της διηθητικότητας του εδάφους είναι πολύ σημαντική, ειδικά σε προβλήματα που αφορούν το περιβάλλον, όπως η άρδευση, η στράγγιση και η υδρολογία (Angelaki et al 2002).

Η παρουσία υψηλών συγκεντρώσεων αλάτων νατρίου στο αρδευτικό νερό, εκτός από τα φυτά, μπορεί να επηρεάσει δυσμενώς και την εδαφική δομή με αποτέλεσμα να δημιουργείται εδαφική κρούστα η οποία αφ' ενός μεν δυσκολεύει την ανάπτυξη των σπόρων και τη διείσδυση του νερού στο έδαφος, αφ' ετέρου δε ευνοεί την έλλειψη επαρκούς αερισμού και το λίμνασμα νερού στον αγρό. Εάν η διηθητικότητα μειωθεί δραστικά, μπορεί να καταστεί αδύνατη η εφαρμογή της απαραίτητης ποσότητας νερού για την καλή ανάπτυξη των φυτών (Μισοπολινός, 1985).

Τα προβλήματα διηθητικότητας αφορούν συνήθως ένα μικρό βάθος του επιφανειακού εδάφους και σχετίζονται κυρίως με την εφαρμογή αρδευτικού νερού το οποίο χαρακτηρίζεται από υψηλή περιεκτικότητα νατρίου και πολύ χαμηλή περιεκτικότητα ασβεστίου. Το νάτριο που περιέχεται στο νερό ιοντοεναλλάσσεται με το ασβέστιο και το μαγνήσιο που περιέχεται στο έδαφος με αποτέλεσμα να υπάρχει σημαντική συσσώρευση νατρίου σε σχέση με το ασβέστιο.

Νερά με υψηλή αλατότητα αυξάνουν τη διηθητικότητα και μερικώς αντισταθμίζουν τα προβλήματα που προκαλεί το αυξημένο SAR. Για δεδομένο SAR, η διηθητικότητα αυξάνεται όσο αυξάνει η αλατότητα του νερού άρδευσης και μειώνεται όσο μειώνεται η αλατότητα. Για το λόγο αυτό το SAR και EC_w πρέπει να λαμβάνονται υπόψη συνδυασμένα για την εκτίμηση και αντιμετώπιση των προβλημάτων διηθητικότητας (Μισοπολινός, 1991).

Κατά κανόνα τα επεξεργασμένα υγρά αστικά απόβλητα περιέχουν πολλά άλατα και άφθονο ασβέστιο, οπότε δεν αναμένεται απομάκρυνση του ασβεστίου του επιφανειακού εδάφους με το αρδευόμενο νερό. Επειδή όμως τα νερά αυτά ενδέχεται να είναι πλούσια και σε νάτριο, η πιθανή υψηλή τιμή του SAR πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπόψη στα προγράμματα επαναχρησιμοποίησης επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων (Μισοπολινός 1985, Misopolinos and Ambas 1989).

Υπάρχουν ειδικές πρακτικές διαχείρισης του συστήματος εδάφους-νερού άρδευσης για να επιλυθούν τα προβλήματα διαπερατότητας και την επιτυχή χρησιμοποίηση νερών με αυξημένο SAR, με την προϋπόθεση ότι αυτές οι πρακτικές εφαρμόζονται συνεχώς, ώστε να μην προκληθεί καταστροφή της εδαφικής δομής (Misopolinos 1985). Τέτοιες πρακτικές διαχείρισης θα αυξήσουν τη διαπερατότητα και θα μειώσουν την ένταση των δευτερογενών

προβλημάτων που σχετίζονται με το μακροχρόνιο λίμνασμα του νερού στην επιφάνεια του εδάφους (π.χ. το πρόβλημα των κουνουπιών).

Οι Friedel et al. (2000) μελέτησαν την επίδραση της μακροχρόνιας άρδευσης με επεξεργασμένα υγρά απόβλητα στις εδαφικές λειτουργίες, δύο τύπων εδαφών. Οι εδαφικές λειτουργίες δεν επηρεάστηκαν, εξαιτίας της μικρής περιεκτικότητας των υγρών αποβλήτων σε βαρέα μέταλλα. Επίσης, οι Γαλάνης κ.α. (2000) παρατήρησαν βελτίωση της κίνησης και κατανομής του νερού σε έδαφος που αρδεύτηκε με επεξεργασμένα αστικά λύματα.

2.4.3 Τοξικότητα ιόντων

Ορισμένα ιόντα που προσλαμβάνονται από τα φυτά, ακόμη και όταν βρίσκονται σε μικρές συγκεντρώσεις στο έδαφος, έχουν τοξική δράση με αποτέλεσμα την πρόκληση ζημιών στο φυτό και τη μείωση της παραγωγής. Τα προβλήματα τοξικότητας των ιόντων παρουσιάζονται συχνά μαζί με τα προβλήματα αλατότητας, κάνοντας τα προβλήματα αυτά πιο πολύπλοκα, παρόλο που μερικές φορές φαινόμενα τοξικότητας εμφανίζονται και σε χαμηλές τιμές αλατότητας. Τα ιόντα στα οποία πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή κατά την άρδευση με υγρά απόβλητα είναι το νάτριο, τα χλωριόντα και το βόριο (Ayers and Westcot 1985, Westcot and Ayers 1985, Maas 1990, Μισοπολινός 1991).

Η συνηθέστερη τοξικότητα από τη χρήση αστικών υγρών αποβλήτων στη γεωργία προέρχεται από το βόριο. Πηγή του βορίου είναι συνήθως τα οικιακά απορρυπαντικά και ορισμένες εκροές από βιομηχανίες. Το χλωριόντα και το νάτριο, επίσης αυξάνονται κατά την οικιακή χρήση του νερού, ιδιαίτερα όταν χρησιμοποιούνται αποσκληρυντικά του νερού. Οι καλλιέργειες δεν παρουσιάζουν την ίδια ανθεκτικότητα στα διάφορα τοξικά ιόντα. Πληροφορίες σχετικά με την ανθεκτικότητα των καλλιεργειών στο βόριο, το χλωριόντα και το νάτριο δίνονται στους Πίνακες 11,12 και 13 (Maas 1984, Maas 1990).

Σε ορισμένες ευαίσθητες καλλιέργειες είναι δύσκολο να περιοριστεί η τοξική δράση ορισμένων ιόντων και στις περιπτώσεις αυτές η μοναδική λύση είναι αλλαγή της καλλιέργειας του νερού άρδευσης του τρόπου εφαρμογής του νερού στον αγρό. Για παράδειγμα, στην άρδευση με καταιονισμό το νάτριο και τα χλωριόντα απορροφώνται απευθείας από το φύλλωμα και προκαλούν ζημιές στα φυτά, ιδιαίτερα όταν η άρδευση εφαρμόζεται σε περιόδους υψηλών θερμοκρασιών, ισχυρών ανέμων και χαμηλής σχετικής υγρασίας. Σε αυτές τις περιπτώσεις συνιστάται άρδευση κατά τη διάρκεια της νύχτας, οπότε αποφεύγονται οι πολύ υψηλές θερμοκρασίες και χαμηλή σχετική υγρασία (Παπαζαφειρίου και Αντωνόπουλος 1991). Τέτοιες τοξικότητες συμβαίνουν σε συγκεντρώσεις νατρίου και χλωρίου μικρότερες από αυτές που προκαλούν τοξικότητα κατά την επιφανειακή άρδευση.

Εκτός από τα προαναφερθέντα ιόντα, υπάρχουν και άλλα που οι συνήθεις συγκεντρώσεις τους είναι μικρότερες από 100 μg/L (Πίνακας 12). Μερικά από αυτά μπορεί να είναι πολύ σημαντικά για την ανάπτυξη των φυτών σε πολύ μικρές συγκεντρώσεις, αλλά γίνονται τοξικά με την αύξηση των συγκεντρώσεων.

Η ύπαρξη μετάλλων στα αστικά υγρά απόβλητα σχετίζεται με την προέλευση των νερών και τις δραστηριότητες της αστικής περιοχής από την οποία προέρχονται τα απόβλητα. Η χρήση των μετάλλων είναι ευρέως διαδεδομένη στη βιομηχανία και τη μεταποίηση καταναλωτικών αγαθών. Επίσης, η παλαίωση και η σταδιακή διάβρωση των δικτύων ύδρευσης και

αποχέτευσης συνεισφέρει στην παρουσία μετάλλων στα υγρά απόβλητα. Για τους λόγους αυτούς, ακόμη και μικρές ποσότητες μετάλλων βρίσκονται πάντοτε στα αστικά υγρά απόβλητα.

Πίνακας 12: Ανθεκτικότητα αγροτικών καλλιεργειών στο θόριο^α (Maas 1990)

Αγροτικές καλλιέργειες	
<u>Πολύ ευαίσθητες (<0.5 mg/L)</u>	<u>Μετρίως ευαίσθητες: (1.0-2.0 mg/L)</u>
Λεμονιά (<i>Citrus limon</i>)	Πιπεριά κόκκινη (<i>Capsicum annuum</i>)
Βατόμουρο (<i>Rubus spp.</i>)	Μπιζέλι (<i>Pisum sativa</i>)
Ευαίσθητες (0.5-0.75 mg/L)	Καρότο (<i>Dacus carota</i>)
Αβοκάντο (<i>Persea americana</i>)	Ραπανάκι (<i>Raphanus sativus</i>)
Γκρέιπφρουτ (<i>Citrus Χparadisi</i>)	Πατάτα (<i>Solanum tuberosum</i>)
Πορτοκαλιά (<i>Citrus sinensis</i>)	Αγγούρι (<i>Cucumis sativus</i>)
Βερυκοκιά (<i>Prunus armeniaca</i>)	<u>Μετρίως ανθεκτικές: (2.0-4.0 mg/L)</u>
Ροδακινιά (<i>Prunus persica</i>)	Μαρούλι (<i>Lactuca sativa</i>)
Κερασιά (<i>Prunus avium</i>)	Μάππα (<i>Brassica oleracea capitata</i>)
Δαμασκηλιά (<i>Prunus domestica</i>)	Σέλινο (<i>Apium graveolens</i>)
Διόσπυρος (<i>Diospyros kaki</i>)	Γογγύλι (<i>Brassica rapa</i>)
Συκιά (<i>Ficus carica</i>)	Γρασίδι Κεντάκι (<i>Poa pratensis</i>)
Αμπέλι (<i>Vitis vinifera</i>)	Βρώμη (<i>Avena sativa</i>)
Καρυδιά (<i>Juglans regia</i>)	Καλαμπόκι (<i>Zea mays</i>)
Ελαιοκάρυο (<i>Carya illinoensis</i>)	Αγκινάρα (<i>Cynara scolymus</i>)
Βίγκνα (<i>Vigna unguiculata</i>)	Καπνός (<i>Nicotiana tabacum</i>)
Κρεμμύδι (<i>Allium cepa</i>)	Σινάπι (<i>Brassica juncea</i>)
<u>Ευαίσθητα (0.75-1.0 mg/L)</u>	Μελίλωτος (<i>Melilotus indica</i>)
Σκόρδο (<i>Allium sativum</i>)	Κολοκυθάκια (<i>Cucurbita pepo</i>)
Γλυκοπατάτα (<i>Ipomoea batatas</i>)	Αρωματικό πεπόνι (<i>Cucumis melo</i>)
Σιτάρι (<i>Triticum aestivum</i>)	Ανθεκτικές (4.0-6.0 mg/L)
Κριθάρι (<i>Hordeum vulgare</i>)	Σόργο (<i>Sorghum bicolor</i>)
Ηλίανθος (<i>Helianthus annuus</i>)	Τομάτα (<i>Lycopersicon esculentum</i>)
Φασολιά (<i>Vigna radiata</i>)	Μηδική (<i>Medicago sativa</i>)
Σουσάμι (<i>Sesamum indicum</i>)	Βίκος (<i>Vicia benghalensis</i>)
Λούπινο (<i>Lupinus hartwegii</i>)	Μαϊντανός (<i>Petroselinum crispum</i>)
Φραουλιά (<i>Fragaria spp.</i>)	Κοκκινογούλια (<i>Beta vulgaris</i>)
Αγκινάρα Jerusalem (<i>Heliantus tuberosus</i>)	Ζαχαρότευτλα (<i>Beta vulgaris</i>)
Φασολιά (<i>Phaseolus vulgaris</i>)	<u>Πολύ ανθεκτικές (6.0-15.0 mg/L)</u>
Φασολιά (<i>Phaseolus lunatus</i>)	Βαμβάκι (<i>Gossypium hirsutum</i>)
Αράπικο φυστίκι (<i>Arachis hypogaea</i>)	Σπαράγγι (<i>Asparagus officinalis</i>)

^a Μέγιστες επιτρεπόμενες συγκεντρώσεις στο νερό του εδάφους χωρίς να παρατηρείται μείωση της παραγωγής. Η ανθεκτικότητα στο βόριο ποικίλει ανάλογα με τις κλιματικές και εδαφικές συνθήκες καθώς επίσης και με τις καλλιεργούμενες ποικιλίες των φυτών. Οι μέγιστες επιτρεπόμενες συγκεντρώσεις βορίου στο αρδευτικό νερό είναι περίπου ίσες ή λίγο μικρότερες από εκείνες του νερού στο έδαφος.

Πίνακας 13: Ανθεκτικότητα διαφόρων καλλιεργειών στα χλωρίοντα (Maas 1990)

Καλλιέργεια	Όριο συγκέντρωσης Cl ⁻ (mol/m ³ νερού)	Μείωση απόδοσης % ανά mol/m ³ Cl ⁻
Φράουλα	10	3.3
Φασόλι	10	1.9
Κρεμμύδι	10	1.6
Καρότο	10	1.4
Μαρούλι	10	1.3
Γογγύλι	10	0.9
Ραπανάκι	10	1.3
Ρύζι (paddy) (a)	30(b)	1.2(b)
Πιπεριά	15	1.4
Τριφύλλι (red)	15	1.2
Τριφύλλι (ladino)	15	1.2
Καλαμπόκι	15	1.2
Λινάρι	15	1.2
Πατάτα	15	1.2
Γλυκοπατάτα	15	1.1
Φασόλι (Broadbean)	15	1.0
Λάχανο	15	1.0
Αλεπονουρά	15	1.0
Σέλινο	15	0.6
Τριφύλλι (Berseem)	15	0.6
Δακτυλίδα	15	0.6
Ζαχαροκάλαμο	15	0.6
Τριφύλλι (Trefoil big)	20	1.9
Εράγρωστις (Lovegrass)	20	0.8
Σπανάκι	20	0.8
Μηδική	20	0.7
Σεσμπάνια (Sesbania)	20	0.7
Αγγούρι	25	1.3
Τομάτα	25	1.0
Μπρόκολα	25	0.9
Κολοκύθι (Squash)	30	1.6
Βίκος (Vetch common)	30	1.1
Αγριόβριζα (Wildrye, Sudangrass)	30	0.4
Παντζάρι (a)	40	0.9
Φεστούκα (Fescue tall)	40	0.5
Κολοκύθι (Squash, Φάλαρη)	45	0.9
Μπιζέλι (Cowpea)	45	0.8
Τριφύλλι (Narrow-leaf)	50	1.2
Ήρα πολυετής	50	1.0
	55	0.8

Σκληρό Σιτάρι	55	0.5
Κριθάρι για ζωοτροφή	60	0.7
Σιτάρι (a)	60	0.7
Σόργο	70	1.6
Αγριάδα	70	0.6
Ζαχαρότευτλα (a)	70	0.6
Βαμβάκι	75	0.5
Κριθάρι (a)	80	0.5

^a Καλλιέργειες λιγότερο ανθεκτικές κατά το φύτεμα των σπόρων .

^b Αναφέρεται σε συνθήκες κορεσμού του εδάφους με νερό.

Πίνακας 14: Ανθεκτικότητα ορισμένων φυτών σε ζημιές της φυλλικής επιφάνειας κατά την εφαρμογή άρδευσης με καταιονισμό, ανάλογα με τη συγκέντρωση Na ή Cl στο νερό άρδευσης^a (Maas 1990)

Συγκεντρώσεις Na ⁺ ή Cl ⁻ σε mg/L ^b			
<5	5-10	10-20	>20
Αμυγδαλιά	Αμπέλι	Μηδική	Κουνουπίδι
Βερυκοκιά	Πιπεριά	Κριθάρι	Βαμβάκι
Εσπεριδοειδή	Πατάτα	Καλαμπόκι	Ζαχαρότευτλα
Δαμασκηλιά	Ντομάτα	Αγγούρι Κάρδαμος Σουσάμι Σόργο	Ηλιάνθος

^a Ευαίσθησία βασισμένη στην απευθείας απορρόφηση αλάτων από τα φύλλα.

^b Οι βλάβες των φύλλων επηρεάζονται από τις καλλιεργητικές και περιβαλλοντικές συνθήκες. Οι τιμές του πίνακα 13 δίνονται ενδεικτικά και αφορούν άρδευση με καταιονισμό κατά τη διάρκεια της ημέρας.

Κάποιες από τις εγκαταστάσεις επεξεργασίας υγρών αστικών αποβλήτων δέχονται και βιομηχανικές εκροές, με αποτέλεσμα την αύξηση της ποσότητας των βαρέων μετάλλων στα απόβλητα αυτά.

Νερά που προέρχονται από κοινότητες μικρού και μέσου μεγέθους, κατά κανόνα δεν είναι επιβαρυνμένα με μεγάλες συγκεντρώσεις μετάλλων, καθώς οι περιοχές αυτές δεν είναι συνήθως βιομηχανοποιημένες. Εξάλλου, τα υγρά απόβλητα που προέρχονται από τέτοιες περιοχές, είναι αυτά που κατά κύριο λόγο προσφέρονται για επαναχρησιμοποίηση, τόσο λόγω της σύστασής τους όσο και λόγω της μικρής απόστασης από την καλλιεργήσιμη γη, γεγονός που καθιστά τη μεταφορά των υγρών αποβλήτων οικονομικά συμφέρουσα.

Παρόλο που οι συμβατικές εγκαταστάσεις επεξεργασίας αποβλήτων δεν είναι σχεδιασμένες για την απομάκρυνση των βαρέων μετάλλων, μέρος αυτών προσροφάται στα οργανικά και ανόργανα στερεά και απομακρύνεται με τις διαδικασίες της καθίζησης των αιωρούμενων στερεών. Υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας, οι συγκεντρώσεις των βαρέων μετάλλων στα

ανεπεξεργαστα απόβλητα μειώνονται κατά 70 έως 90 % μετά τη δευτεροβάθμια επεξεργασία.

Σε πείραμα άρδευσης ζαχαρότευτλων με επεξεργασμένα υγρά απόβλητα των Πανώρα κ.α. (1998) δεν παρατηρήθηκε επιβάρυνση του εδάφους και των φυτικών ιστών από τα διάφορα μέταλλα. Επίσης, οι Πανώρας κ.α. (1999) από μελέτη καταλληλότητας για άρδευση των επεξεργασμένων υγρών αστικών αποβλήτων, διαπίστωσαν τον κίνδυνο τοξικότητας από τα στοιχεία Na, Cl, B. Ο Βουρδουμπάς (2000), ανέφερε ότι δεν υπήρξε επιβάρυνση του εδάφους με βαρέα μέταλλα κατά την άρδευση φυτών Ευκαλύπτου, Λεύκας και Πλατάνου με επεξεργασμένα υγρά απόβλητα. Οι Friedel et al. (2000) διαπίστωσαν ότι τα βαρέα μέταλλα που περιείχονταν στα επεξεργασμένα υγρά απόβλητα υπήρχαν σε μικρές ποσότητες και δεν επηρέασαν τις εδαφικές λειτουργίες. Οι Vedry et al. (2001) παρατήρησαν ότι λαχανικά που καλλιεργούνταν με επεξεργασμένα υγρά απόβλητα συγκρατούσαν βαρέα μέταλλα, ωστόσο συγκέντρωσή τους ήταν κάτω του επιτρεπόμενου ορίου. Οι Yoon et al. (2001) μελέτησαν την άρδευση ρυζιού με επεξεργασμένα υγρά απόβλητα στο Πανεπιστήμιο Konkuk της Σεούλ. Τα διάφορα μέταλλα δεν ήταν ανασταλτικός παράγοντας της ανάπτυξης των φυτών. Οι Σακελλαρίου κ.α. (2003) σε πείραμα άρδευσης χλοοτάπητα με επεξεργασμένα υγρά αστικά απόβλητα της πόλεως του Βόλου, διαπίστωσαν ότι η συγκέντρωση των χλωριόντων ήταν αρκετά υψηλή (1460 mg/L) στα απόβλητα. Εντούτοις, η απόδοση του χλοοτάπητα δεν διέφερε στατιστικά σημαντικά σε σχέση με τα τεμάχια που αρδεύονταν με καθαρό νερό. Οι τιμές των υπόλοιπων μετάλλων ήταν εντός των επιτρεπόμενων ορίων. Οι Sakellariou et al. (2003 a,b) σε πείραμα άρδευσης κωνοφόρων ειδών της οικογένειας Cupressaceae με επεξεργασμένα υγρά απόβλητα και καθαρό νερό παρατήρησαν ότι δεν υπήρξε συσσώρευση τοξικών στοιχείων στο έδαφος και τα φυτά. Τα μετρούμενα χαρακτηριστικά (ύψος, διάμετρος φυτοκόμης) δεν διέφεραν στατιστικά σημαντικά στις δύο μεταχειρίσεις.

Πίνακας 15: Συνιστώμενες μέγιστες συγκεντρώσεις μετάλλων σε νερά που χρησιμοποιούνται το πολύ 20 χρόνια και σε εδάφη λεπτόκοκκης υφής με pH 6.0-8.5 (Σακελλαρίου κ.α., 2003)

Στοιχείο	Συνιστώμενη μέγιστη συγκέντρωση (mg/L)	Παρατηρήσεις
A1 (Αργίλιο)	20.0	Μπορεί να προκαλέσει σημαντική μείωση της παραγωγής σε όξινα εδάφη (pH=5.5), αλλά σε νατριωμένα εδάφη (pH>7.0) τα ιόντα του A1 καθιζάνουν και ελαχιστοποιείται η τοξικότητά του.
As (Αρσενικό)	2.0	Η φυτοτοξικότητα του ποικίλλει σε μεγάλο βαθμό και κυμαίνεται από 12 mg/L για το Sudan grass έως λιγότερο από 0.05 mg/L για το ρύζι.
Cd (Κάδμιο)	0.05	Είναι τοξικό στα φασόλια, παντζάρια, ζαχαρότευτλα και κοκκινογούλια, όταν η συγκέντρωσή του στο θρεπτικό διάλυμα είναι έως 0.1 mg/L. Συνιστώνται συντηρητικά όρια εξαιτίας της τάσης του να συσσωρεύεται σε φυτικούς ιστούς και εδάφη σε συγκεντρώσεις που μπορεί να είναι επιβλαβείς για τους ανθρώπους.
Co (Κοβάλτιο)	5.0	Είναι τοξικό στη ντομάτα, όταν η συγκέντρωσή του στο θρεπτικό διάλυμα φθάνει τα 0.1 mg/L. Σε ουδέτερα και νατριωμένα εδάφη καθίσταται αδρανές.

Cr (Χρώμιο)	1.0	Θεωρείται, όχι πάντα, βασικό στοιχείο στην ανάπτυξη των φυτών. Εξαιτίας της περιορισμένης γνώσης πάνω στην φυτοτοξικότητα, συνιστώνται συντηρητικές συγκεντρώσεις.
Cu (Χαλκός)	5.0	Είναι τοξικό σε αρκετά φυτά, όταν οι συγκεντρώσεις του στο θρεπτικό διάλυμα κυμαίνονται από 0.1 έως 1.0 mg/L.
F (Φθόριο)	15.0	Αδρανοποιείται σε ουδέτερα και νατρωμένα εδάφη.
Fe (Σίδηρος)	20.0	Σε αεριζόμενα εδάφη δεν είναι τοξικό για τα φυτά. Μπορεί όμως να συμβάλλει στην οξίνιση των εδαφών και να μειώσει τη διαθεσιμότητα του φωσφόρου και του μολυβδενίου που είναι σημαντικά στοιχεία για τα φυτά. Άρδευση με καταιονισμό δημιουργεί αποθέσεις σε φυτά, εξοπλισμό και κτίσματα.
Mn (Μαγγάνιο)	10.0	Τοξικό σε διάφορα φυτά σε συγκεντρώσεις από μερικά δέκατα έως μερικά mg/L, αλλά συνήθως μόνο σε όξινα εδάφη.
Mo (Μολυβδένιο)	0.05	Μη τοξικό για τα φυτά, όταν βρίσκεται σε κανονικές συγκεντρώσεις στο έδαφος και στο νερό. Μπορεί να είναι τοξικό για τα ζώα, όταν βοσκήσουν σε εδάφη με υψηλές συγκεντρώσεις διαθέσιμου μολυβδενίου.
Nί (Νικέλιο)	2.0	Τοξικό σε διάφορα φυτά σε συγκεντρώσεις από 0.5 έως 1.0 mg/L. Μειωμένη τοξικότητα σε ουδέτερα ή αλκαλικά pH.
Pb (Μόλυβδος)	5.0	Σε πολύ υψηλές συγκεντρώσεις μπορεί να προκαλέσει ανάσχεση της αύξησης των φυτικών κυττάρων.
Se (Σελήνιο)	0.02	Τοξικό στα φυτά, ακόμα και σε μικρές συγκεντρώσεις, όπως 0.025 mg/L. Επίσης, είναι τοξικό στα ζώα που βόσκουν σε εδάφη με σχετικά υψηλές συγκεντρώσεις εφαρμοζόμενου σεληνίου. Αντίθετα, σε πολύ μικρές
Sn (Κασσίτερος)	-	Δεν προσλαμβάνεται από τα φυτά. Συγκεκριμένα επίπεδα ανεκτικότητας άγνωστα.
Zn (Ψευδάργυρος)	10.0	Τοξικό σε πολλά φυτά σε μεγάλο εύρος συγκεντρώσεων. Η τοξικότητά του μειώνεται όταν το pH >6 και τα εδάφη είναι καλής δομής ή οργανικά.

2.4.4 Θρεπτικά στοιχεία

Τα θρεπτικά στοιχεία που περιέχονται στα επεξεργασμένα υγρά αστικά απόβλητα αποτελούν ένα βασικό πλεονέκτημα της άρδευσης με τέτοιο νερό, καθώς μειώνουν την ανάγκη προσθήκης χημικών λιπασμάτων. Ωστόσο, η περίσσεια θρεπτικών στοιχείων στα υγρά απόβλητα μπορεί να προκαλέσει προβλήματα σε ορισμένες καλλιέργειες. Τα θρεπτικά στοιχεία που συνήθως υπάρχουν στα αστικά υγρά απόβλητα περιλαμβάνουν άζωτο, φώσφορο και περιστασιακά κάλιο, ψευδάργυρο, βόριο και θείο.

Η συνολική ποσότητα αζώτου που περιέχεται σε αστικά απόβλητα που έχουν υποστεί δευτεροβάθμια επεξεργασία, κατά κανόνα κυμαίνεται από 20 έως 60 mgN/L, ενώ τόσο η συγκέντρωση του αζώτου όσο και οι μορφές με τις οποίες βρίσκεται στα υγρά απόβλητα (αμμωνιακό, νιτρικό και οργανικό) εξαρτώνται από το βαθμό και το είδος της επεξεργασίας που έχουν υποστεί. Σε κάθε άρδευση μαζί με το νερό εφαρμόζεται και άζωτο που λιπαίνει τα φυτά. Αυτός ο τρόπος λίπανσης, ενώ ευνοεί τα φυτά στα πρώτα στάδια της ανάπτυξής τους, μπορεί να προκαλέσει προβλήματα στο στάδιο της ωριμότητας των φυτών, όπου περίσσεια αζώτου είναι δυνατό να προκαλέσει έντονη βλάστηση, καθυστέρηση στην ωρίμανση του

καρπού και υποβάθμιση της ποιότητάς του. Στις περιπτώσεις που το άζωτο που δίνεται με τα υγρά απόβλητα είναι λιγότερο από αυτό που χρειάζεται η καλλιέργεια, απαιτείται συμπληρωματική αζωτούχος λίπανση. Επίσης, ακόμα και στις περιπτώσεις κατά τις οποίες στα υγρά απόβλητα περιέχεται αρκετό άζωτο για την κάλυψη των αναγκών της καλλιέργειας, πιθανώς να απαιτείται, αρχικά τουλάχιστον, βασική ανόργανος αζωτούχος λίπανση, ιδιαίτερα όταν οι προφυτρωτικές αρδεύσεις γίνουν με νερό από συμβατικές πηγές.

Ο φώσφορος είναι επίσης απαραίτητος για όλα τα φυτά. Η συγκέντρωση του φωσφόρου στα απόβλητα που έχουν υποστεί δευτεροβάθμια επεξεργασία κυμαίνεται από 6 έως 15 mg/L (15-35 mg/L P₂O₅), εκτός από τις περιπτώσεις όπου γίνεται ειδική επεξεργασία για την απομάκρυνσή του. Η άρδευση με υγρά απόβλητα αυξάνει σταδιακά τα επίπεδα φωσφόρου στο έδαφος, μειώνοντας την ανάγκη για μελλοντική συμπληρωματική εφαρμογή φωσφορούχου λίπανσης. Περίσσεια φωσφόρου γενικά δεν αποτελεί πρόβλημα, ωστόσο είναι χρήσιμο να παρακολουθείται η παρουσία του στα υγρά απόβλητα και στο έδαφος. Το κάλιο στα απόβλητα που έχουν υποστεί δευτεροβάθμια επεξεργασία κυμαίνεται από 10 έως 30 mg/L (Pescod 1992).

Σχεδόν όλα τα ανακτημένα νερά που προέρχονται από υγρά απόβλητα περιέχουν αρκετό ψευδάργυρο για να διορθωθούν οι ελλείψεις του εδάφους σε διάστημα 1 έως 3 έτη. Η ύπαρξη του ψευδαργύρου θεωρείται ευεργετική για εδάφη με ανεπαρκείς συγκεντρώσεις στο στοιχείο αυτό, αλλά η μέγιστη τιμή συγκέντρωσής του στο νερό άρδευσης δεν πρέπει να υπερβαίνεται (2 mg/L). Σε μέρη όπου το ετήσιο ύψος βροχής είναι υψηλό μπορεί να υπάρξει έλλειψη θείου, που προκαλεί μειωμένη παραγωγή στις καλλιέργειες. Στα υγρά απόβλητα υπάρχει κατά κανόνα επαρκές θείο, ώστε να διορθώνονται οι ελλείψεις του στο έδαφος. Τα υγρά απόβλητα περιέχουν επαρκείς ποσότητες βορίου, ώστε να διορθώνουν ελλείψεις του στοιχείου αυτού στο έδαφος. Μεγαλύτερη προσοχή πρέπει να δίνεται σε πιθανή περίσσεια βορίου, η οποία μπορεί να οδηγήσει σε τοξικότητες και μειωμένη φυτική παραγωγή.

Οι Hayes et al. (1990) βρήκαν ότι άρδευση με επεξεργασμένα υγρά απόβλητα σε καλλιέργεια χλοοτάπητα είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση της συγκέντρωσης των NO₃⁻ στο υπέδαφος. Οι Vasquez-Montiel et al. (1996) διεξήγαγαν πειράματα άρδευσης καλαμποκιού με επεξεργασμένα υγρά απόβλητα. Τα υγρά απόβλητα περιείχαν υψηλές ποσότητες N με νιτρική μορφή και P. Δεν παρατηρήθηκε συσσώρευση στο έδαφος, ενώ προς το τέλος της καλλιεργητικής περιόδου υπήρξε συσσώρευση νιτρικών στο έδαφος. Οι Γαλάνης κ.α. (2000) δεν παρατήρησαν σημαντική διαφορά στην αποθήκευση των θρεπτικών στοιχείων στο έδαφος που αρδεύτηκε με απόβλητα, σε σύγκριση με το έδαφος που αρδεύτηκε με καθαρό νερό.

Οι Friedel et al. (2000) ανέφεραν ότι ολικός οργανικός άνθρακας αυξήθηκε σε εδάφη που αρδεύονταν με επεξεργασμένα υγρά απόβλητα για 25, 65 και 80 χρόνια, ενώ οι Panogas et al. (2001) σε μελέτη άρδευσης καλαμποκιού με υγρά απόβλητα και καθαρό νερό, διαπίστωσαν ότι η συγκέντρωση των ιχνοστοιχείων στα φυτά και το έδαφος ήταν χαμηλή. Παρ' όλα αυτά, οι αποδόσεις των φυτών δεν διέφεραν σημαντικά. Επίσης, οι Panogas et al. (2001) σε πειράματα άρδευσης βαμβακιού με επεξεργασμένα υγρά απόβλητα, ανέφεραν ότι η απόδοση του βαμβακιού αυξήθηκε κατά την άρδευση με τα υγρά απόβλητα σε σχέση με το καθαρό νερό. Οι Βακάλης και Τσαντήλας (2002) μελέτησαν την άρδευση καλαμποκιού και βαμβακιού με υγρά απόβλητα και καθαρό νερό. Για το καλαμπόκι, η άρδευση με υγρά απόβλητα και η χορήγηση πλήρους ανόργανης λίπανσης αύξησε την απόδοση σε σχέση με την άρδευση με καθαρό νερό και ανόργανη λίπανση. Τέλος, οι Σακελλαρίου κ.α. (2003) σε πείραμα άρδευσης χλοοτάπητα με επεξεργασμένα αστικά απόβλητα που προέρχονταν από

τριτοβάθμιο σύστημα επεξεργασίας και με καθαρό νερό, παρατήρησαν ότι οι συγκεντρώσεις των θρεπτικών στοιχείων ήταν χαμηλές. Η απόδοση του χλοοτάπητα ήταν ίδια στατιστικά και για τις δύο μεταχειρίσεις, όπως και η περιεκτικότητα της χλωροφύλλης στους ιστούς των φύλλων.

2.4.5 Διάφορα προβλήματα

Το pH του νερού σπάνια αποτελεί από μόνο του πρόβλημα. Ωστόσο, η τιμή του pH έξω από τα συνηθισμένα όρια (6.5-8.5) αποτελεί ένδειξη ότι το νερό είναι υποβαθμισμένης ποιότητας με πιθανή παρουσία τοξικών ιόντων. Τιμές pH εκτός των παραπάνω ορίων πρέπει να αποτελούν προειδοποίηση και να οδηγούν σε περαιτέρω αναλύσεις και εκτιμήσεις για την ποιότητα του νερού και σε πιθανές διορθώσεις-βελτιώσεις του νερού άρδευσης ή του τρόπου διαχείρισης αυτού. Άλλο πιθανό πρόβλημα, το οποίο είναι και το πιο συχνά παρατηρούμενο, είναι η έμφραξη συστημάτων που αρδεύονται με καταιονισμό. Η ανάπτυξη διαφόρων μικροοργανισμών στις οπές εξόδου των εκτοξευτήρων και των σταλακτήρων στους σωλήνες μεταφοράς του νερού προκαλούν εμφράξεις όπως επίσης και οι μεγάλες συγκεντρώσεις φυκών (algae) και αιωρούμενων στερεών (English 1985, Nakayama and Bucks 1985, Hilman and Dunn 1989). Εάν τα επίπεδα υπολειμματικού χλωρίου παραμένουν υψηλά κατά το χρόνο εφαρμογής του νερού προκαλούνται ζημιές στα φυτά, εφ' όσον χρησιμοποιούνται συστήματα καταιονισμού. Υπολειμματικό χλώριο (Cl_2) λιγότερο από 1 mg/L δεν επηρεάζει το φύλλωμα των φυτών. Όταν όμως υπερβαίνει τα 5 mg/L μπορεί να προκαλέσει σοβαρές ζημιές στα φυτά (Asano et al. 1985).

Από εργασίες, αναφέρεται ότι σε πείραμα άρδευσης καλαμποκιού με υγρά απόβλητα, η νιτροποίηση της αμμωνίας προκάλεσε μια μικρή μείωση της τιμής του pH, η οποία εξομαλύνθηκε κατά τη διάρκεια της αρδευτικής περιόδου. Οι Paragiannopoulou et al. (1998) σε πείραμα μελέτης των χαρακτηριστικών 3 τύπων σταλακτήρων, ύστερα από άρδευση με καθαρό νερό και υγρά απόβλητα, διαπίστωσαν την καλή λειτουργία των σταλακτήρων και με τις δύο ποιότητες νερών άρδευσης. Οι Al-Lahham et al. (2003) σε πείραμα άρδευσης τομάτας με απόβλητα και καθαρό νερό επισήμαναν ότι το pH των καρπών της τομάτας που αρδεύτηκαν με απόβλητα δεν μεταβλήθηκε, ενώ παρατηρήθηκε μια μικρή συσσώρευση μικροβιακού φορτίου στην επιδερμίδα των καρπών.

2.5 Ποιότητα εδάφους και εδαφική υγεία

2.5.1 Λειτουργίες των εδαφικών οικοσυστημάτων και οφέλη για τον άνθρωπο

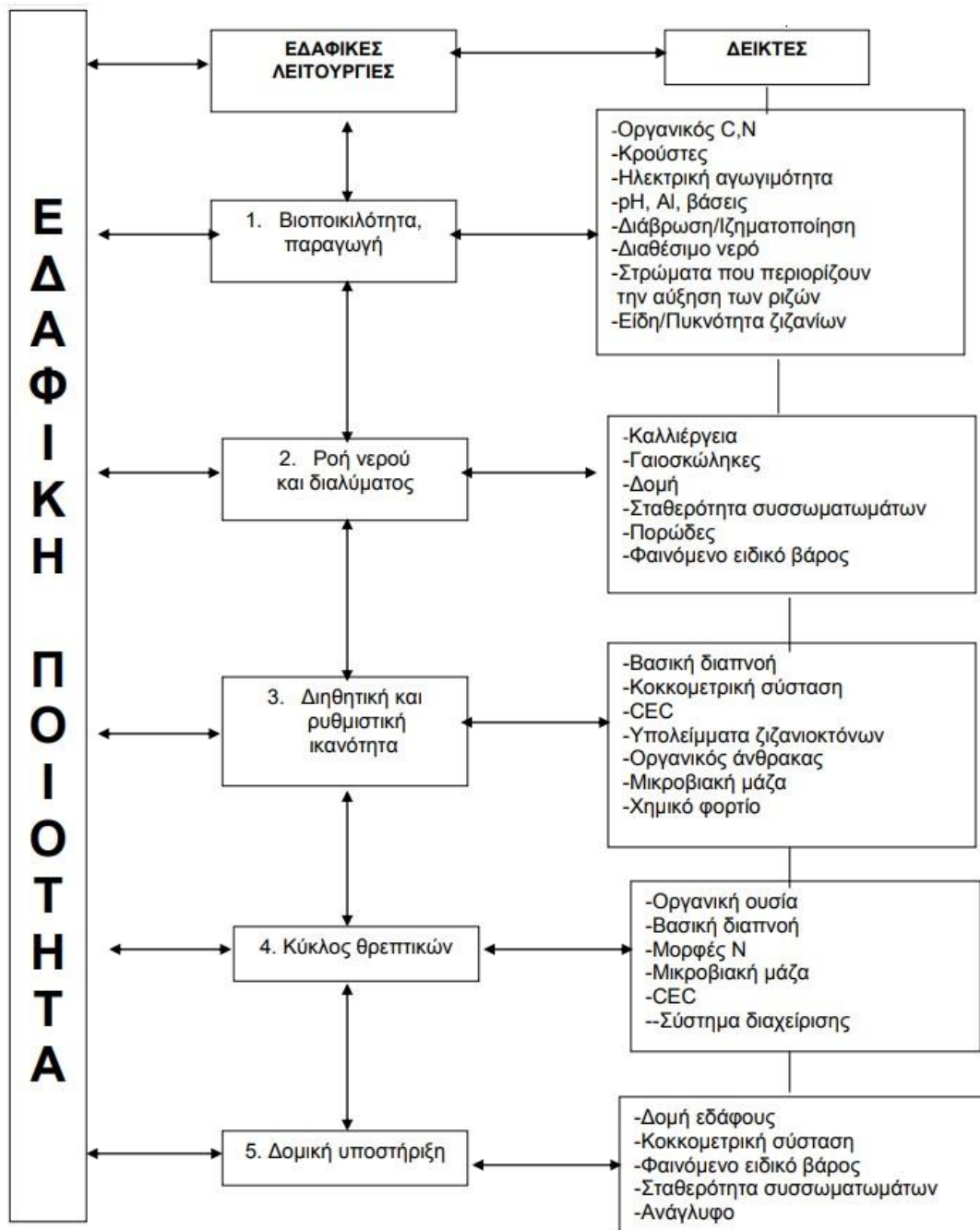
Οι λειτουργίες ενός οικοσυστήματος είναι αποτέλεσμα των φυσικών, χημικών και βιολογικών διεργασιών που λαμβάνουν χώρα σε αυτό. Οι εδαφικές λειτουργίες, όπως οι λειτουργίες κάθε άλλου οικοσυστήματος, δεν είναι ανεξάρτητες, αλλά επηρεάζουν η μία την άλλη. Πρωταρχικός όμως παράγοντας που τις καθορίζει είναι η δράση των μικροοργανισμών και οι βιογεωχημικοί κύκλοι των στοιχείων. Από τις λειτουργίες απορρέουν και τα οφέλη εδαφών για τον άνθρωπο. Παραδείγματα εδαφικών λειτουργιών είναι η στήριξη τροφικών πλεγμάτων, η μηχανική υποστήριξη φυτών, ο μετασχηματισμός θρεπτικών, η συγκράτηση τοξικών ουσιών και η παγίδευση ή έκλυση CO₂. Ο συνδυασμός των λειτουργιών αυτών (σύνθετες λειτουργίες) έχει ως αποτέλεσμα την ικανότητα του εδάφους να αποικοδομεί ρύπους (αναφέρεται στις λειτουργίες στήριξης τροφικών πλεγμάτων και μετασχηματισμού θρεπτικών), να παρέχει στήριξη στα φυτά και τη βιοποικιλότητα (αναφέρεται στις λειτουργίες αποθήκευσης νερού, στήριξης τροφικών πλεγμάτων και μηχανικής υποστήριξης φυτών) και να αντέχει στη διάβρωση και άλλους παράγοντες υποβάθμισης. Από τις παραπάνω λειτουργίες προκύπτουν οφέλη του εδάφους για τον άνθρωπο: θεμελιωτικά, εξορυκτικά, αποικοδομητικά, αποταμιευτικά, αντιπλημμυρικά, βιολογικά, κλιματοροθμιστικά, αγρονομικά, αισθητικά, εκπαιδευτικά, αναψυχής, τουριστικά, αρχαιολογικά και πολιτιστικά. Τα οφέλη ενός συγκεκριμένου εδάφους είναι δυνατό σήμερα να αποτελούν αντικείμενο κάποιων χρήσεων ή να μην χρησιμοποιείται καθόλου. Από τα εδαφικά οφέλη, αυτά που χρησιμοποιούνται ονομάζονται χρήσεις. Ο βαθμός χρήσης εξαρτάται από οικονομικούς παράγοντες, αλλά παράλληλα και από την ανάγκη να προστατευθεί το εδαφικό οικοσύστημα. Τα εδαφικά οφέλη μπορούν να παραλληλισθούν με τη δυναμική ενέργεια του εδαφικού συστήματος, τα οποία από τη στιγμή που χρησιμοποιούνται από τον άνθρωπο μετατρέπονται σε χρήσεις κατά παρόμοιο τρόπο με τον οποίο η δυναμική ενέργεια μετατρέπεται σε κινητική. Η ορθολογική διαχείριση της κινητικής ενέργειας, δηλαδή των χρήσεων, είναι ο κύριος μηχανισμός που συντελεί στη διατήρηση της δυναμικής ενέργειας, δηλαδή στη διατήρηση των οφελών και επομένως στην αειφορία, του εδαφικού οικοσυστήματος. Η αξιολόγηση του βαθμού επιτέλεσης μιας λειτουργίας και του επιπέδου του οφέλους αποτελεί κίνητρο αλληπάλληλων δημιουργικών προσεγγίσεων. Η αξιολόγηση βασίζεται σε διάφορες εδαφικές ιδιότητες-δείκτες, μερικοί από τους οποίους έχουν ήδη καθιερωθεί και άλλοι βρίσκονται υπό διερεύνηση. Η γνώση των εδαφικών λειτουργιών είναι πρώτη ανάγκη, διότι οι λειτουργίες προσδιορίζουν τα οφέλη για τον άνθρωπο και θέτουν το πλαίσιο για τη σωστή διαχείριση του οικοσυστήματος. Η ποιότητα των εδαφικών πόρων θέτει ακριβώς αυτό το πλαίσιο αξιολόγησης των εδαφικών λειτουργιών. Η βιβλιογραφική ανασκόπηση έδειξε ότι δεν υπάρχει ενιαία προσέγγιση στον καθορισμό των εδαφικών λειτουργιών. Διάφοροι συγγραφείς έχουν προσεγγίσει με διαφορετικό τρόπο τον καθορισμό της εδαφικής ποιότητας, όπως αυτή ορίζεται από έναν αριθμό εδαφικών λειτουργιών. Για παράδειγμα, οι Nausbach και Tugel (1997) προτείνουν τις λειτουργίες του σχήματος της Εικόνας 2 ως τις βασικές εδαφικές λειτουργίες και μάλιστα σε κάθε λειτουργία αντιστοιχούν έναν αριθμό μετρήσιμων ιδιοτήτων-δεικτών για την

αξιολόγηση της λειτουργίας σε μία δεδομένη χρονική στιγμή καθώς και την εκτίμηση της πορείας που θα ακολουθήσει η κάθε λειτουργία στον χρόνο (Γεωργιάδου,2009).

2.5.2 Εδαφική υγεία

Ο όρος “υγεία του εδάφους” απαντάται στη διεθνή βιβλιογραφία ως συνώνυμος όρος της “ποιότητας του εδάφους”. Οι Harris κ.ά. (1996) προτείνουν οι δύο όροι να χρησιμοποιούνται ταυτόσημα και τονίζουν τον λειτουργικό ρόλο του εδάφους σε σχέση με την παραγωγικότητα, την ποιότητα του περιβάλλοντος και την υγεία ανθρώπων και ζώων, σε αντίθεση με την αντίληψη, η οποία θεωρεί το έδαφος πηγή ορυκτών, μεταλλευμάτων και υλικών για οικοδόμηση. Κάτω από αυτό το πρίσμα οι όροι “ποιότητα” και “υγεία” θα χρησιμοποιούνται και εδώ ως ταυτόσημοι. Αν και η έννοια της ποιότητας έχει επικρατήσει μεταξύ των επιστημόνων, εντούτοις, οι παραγωγοί προτιμούν την έννοια της υγείας του εδάφους. (Harris και Bezdíček 1994). Έρευνες των Romig κ.ά. (1995) έδειξαν ότι οι παραγωγοί δίνουν έμφαση στην οπτική αξιολόγηση του εδάφους και στη χρήση ποιοτικών δεικτών, βάσει των οποίων χαρακτηρίζουν τα εδάφη ως υγιή ή μη υγιή. Αντίθετα οι επιστήμονες δίνουν έμφαση στην αξιολόγηση των λειτουργιών του εδάφους με τη χρήση ποσοτικών δεικτών (Karlen κ.ά. 1997). Ο όρος “υγεία του εδάφους” τονίζει ιδιαίτερα την παραγωγικότητα και την ικανότητα του εδάφους να υποστηρίζει την υγεία ανθρώπων και ζώων και κατά συνέπεια προτιμάται από τους παραγωγούς, οι οποίοι ενδιαφέρονται κυρίως για την παραγωγικότητα του εδάφους και για τη διαφύλαξη της υγείας τους, αλλά και των ζώων τα οποία εκτρέφουν. Αντίθετα, η επιστημονική κοινότητα τονίζει ιδιαίτερα τη συσχέτιση της εδαφικής ποιότητας με την ποιότητα του νερού και του αέρα γιατί θέλει να υπογραμμίσει τα ακόλουθα (Λύκου,2011):

1. Την ανάγκη για εκτίμηση της ποιότητας του εδάφους με ποσοτικούς δείκτες, η οποία γινόταν μέχρι σήμερα στον ατμοσφαιρικό αέρα και το νερό,
2. Την ανάγκη για μία ολοκληρωμένη αντίληψη της ποιότητας του εδάφους ξεφεύγοντας από τη μονοδιάστατη αντίληψη που επικρατούσε παλαιότερα, σύμφωνα με την οποία “καλό” έδαφος είναι αυτό, που δίνει μεγάλη παραγωγή,
3. Το ρόλο που έχουν παίξει συγκεκριμένες γεωργικές πρακτικές στην υποβάθμιση του ατμοσφαιρικού αέρα και των υπογείων και επιφανειακών υδάτων.



Εικόνα 2: Γραφική παράσταση της βασικής ιδέας της εδαφικής ποιότητας (Mausbach and Tugel 1997)

2.6 Βιοποικιλότητα

2.6.1 Ορισμός

Βιολογική ποικιλότητα ή βιοποικιλότητα είναι το σύνολο των ειδών που καταγράφονται σε κάθε μία από τις κατηγορίες των εδαφικών οργανισμών. Η βιοποικιλότητα εκφράζεται σε τρία επίπεδα: τη γενετική ποικιλότητα, την ποικιλότητα των ειδών και την ποικιλότητα των οικοσυστημάτων και τοπίων (Ηλίας, 2010). Το πιο σημαντικό χαρακτηριστικό της βιοποικιλότητας είναι η δυνατότητα προσαρμοστικότητας που παρέχει στους οργανισμούς σε ένα περιβάλλον που μεταβάλλεται. Επίσης επηρεάζει τη λειτουργία και τη δυναμική των οικοσυστημάτων και ως εκ τούτου ζωτικής σημασίας υπηρεσίες και αγαθά από τα οποία εξαρτάται η υγεία και η ευημερία, όπως η παραγωγή τροφίμων, η διατήρηση της γονιμότητας του εδάφους, η ανακύκλωση των θρεπτικών στοιχείων, η ποιότητα της ατμόσφαιρας, η παραγωγή φαρμάκων και η ρύθμιση του κλίματος. Εκτός αυτών, πάρα πολλά είδη στη φυλογενετική τους εξέλιξη έχουν συνδεθεί στενά μεταξύ τους και συχνά η ύπαρξη του ενός εξαρτάται από την διατήρηση του άλλου (Ηλίας, κ.ά., 2010). Η βιοποικιλότητα είναι η ποικιλία των ζωντανών οργανισμών και αναγνωρίζεται σε διαφορετικά επίπεδα: σε γενετικό επίπεδο, σε επίπεδο αριθμού ειδών (φυτικών και ζωικών), σε επίπεδο ποικιλότητας ενδιαιτημάτων και οικοσυστημάτων (Murthy et al., 2003). Σύμφωνα με την παγκόσμια εκτίμηση της βιοποικιλότητας ο συνολικός αριθμός φυτικών και ζωικών ειδών είναι μεταξύ 13 και 14 εκατομμυρίων ειδών (Murthy, 2003; Heywood, 1995).

2.6.2 Χαρακτηριστικά βιοποικιλότητας

Το έδαφος είναι βιολογικά ενεργό, επειδή μέσα στη μάζα του ζει πλήθος οργανισμών, από μικροσκοπικού μεγέθους βακτήρια έως μεγαλύτερα σε μέγεθος σπονδυλωτά (π.χ. τρωκτικά). Ο αριθμός αλλά και το είδος των οργανισμών μεταβάλλονται με το βάθος και άλλα γνωρίσματα του εδάφους. Οι οργανισμοί επιζούν και αναπτύσσονται ευκολότερα εκεί όπου υπάρχουν οι βέλτιστες αβιοτικές συνθήκες και κυρίως το κατάλληλο δυναμικό οξειδοαναγωγής, το pH, η αλατότητα, η θερμοκρασία, το φως και η υγρασία, για την επιβίωσή τους. Η πλειονότητα των οργανισμών του εδάφους ζει στα πρώτα 10 cm, τα οποία συνήθως αντιστοιχούν στον οργανικό εδαφικό ορίζοντα. Μια μέση κατά βάρος ποσοστιαία κατανομή των οργανισμών στα εδάφη είναι η παρακάτω (Σακελλαριάδης 1990):

- Μύκητες και φύκη, περίπου 40%,
- Ακτινομύκητες και βακτήρια, 40%,
- Γαιοσκώληκες και άλλοι οργανισμοί, 15%,
- Μεγαλύτεροι σε μέγεθος οργανισμοί, 5%

Από τους οργανισμούς του εδάφους, εκείνοι που παρουσιάζουν το μεγαλύτερο ενδιαφέρον από την άποψη των βιολογικών διεργασιών είναι τα βακτήρια, οι ακτινομύκητες, οι μύκητες, τα πρωτόζωα, οι νηματώδεις, οι γαιοσκώληκες, τα μαλάκια και τα αρθρόποδα.

Όταν το περιβάλλον είναι χωρικά πολύ ετερογενές, οι ρυθμοί εξαφάνισης των ειδών είναι χαμηλοί γιατί υπάρχει μειωμένη ανταγωνιστική λειτουργία των οργανισμών. Επίσης η μεγάλη ποικιλότητα ενδαιτημάτων προωθεί την γένεση ειδών (ειδογένεση) με αποτέλεσμα την ύπαρξη πιθανοτήτων δημιουργίας μεγάλης ποικιλομορφίας στο περιβάλλον (Murthy, 2003). Οι παράγοντες της βιοποικιλότητας σε ένα οικοσύστημα μπορούν να είναι είτε βιοτικοί είτε αβιοτικοί, μέσω των οποίων καθορίζεται η δομή, η λειτουργία και η σύνθεσή του (Amis et al., 2009; Noss, 1990). Η σχέση μεταξύ φυσικών και ανθρωπογενών διεργασιών στην βιοποικιλότητα είναι πολύπλοκη (Murthy et al., 2003).

2.6.3 Παράγοντες που σχετίζονται με την βιοποικιλότητα

Ως γνωστόν η βιοποικιλότητα μπορεί να υπολογιστεί από τον αριθμό των ειδών σε μία περιοχή. Για μία ολοκληρωμένη αξιολόγηση των ειδών και της βιοποικιλότητας των οικοτόπων, οι παράγοντες των ενδαιτημάτων (πχ περιβαλλοντικοί παράγοντες όπως το κλίμα, η φυσιογραφία, η βλάστηση, το έδαφος και η γεωλογία) πρέπει να συμπεριλαμβάνονται με την ίδια σημασία που έχει η ποικιλότητα των ειδών. Τα περιβαλλοντικά δεδομένα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση της σχετικής βιοποικιλότητας της υπό μελέτη περιοχής λόγω της περιβαλλοντικής διαφοροποίησης (του ενδαιτήματος ή του οικοσυστήματος) που σχετίζεται με την ποικιλότητα των ειδών (Salem, 2003). Το εύρος και ο πλούτος των ειδών συσχετίζονται με παράγοντες των ενδαιτημάτων αλλά και το αντίστροφο. Ορισμένες φορές αυτοί οι παράγοντες μπορούν να συνδυαστούν σε συνθετικούς οικολογικούς χάρτες (Salem, 2003; Omernik, 1987).

2.7 Αφθονία οργανισμών

Η αφθονία είναι ο συνολικός πληθυσμός της κάθε κατηγορίας οργανισμών του εδάφους

2.7.1 Παραγομένη βιομάζα και μεταβολική δραστηριότητα

Τα είδη και ο πληθυσμός των οργανισμών του εδάφους ελέγχεται από φυσικούς παράγοντες (π.χ., η υγρασία και η θερμοκρασία), βιοτικούς παράγοντες (π.χ., η θήρευση και ο ανταγωνισμός) και από χημικές ιδιότητες του εδάφους (π.χ., η οξύτητα, τα διαλυμένα θρεπτικά συστατικά και η αλατότητα). Ως αποτέλεσμα, εδάφη με διαφορετικά φυσικοχημικά χαρακτηριστικά, ιστορικό χειρισμών και περιβαλλοντικών συνθηκών διαφέρουν σε ότι αφορά τη σύσταση και τη δομή των κοινωνιών των οργανισμών και στην αφθονία τους. Εδάφη με ιστορικό μηχανικής κατεργασίας ενδέχεται να εμφανίζουν μικρότερο αριθμό και βιομάζα οργανισμών. Κυρίως αυτό αφορά τους οργανισμούς που συγκαταλέγονται στην πανίδα, σε σχέση με μη διαταραγμένο έδαφος. Γενικά, η συνολική βιομάζα, δηλαδή το ζωντανό τμήμα του εδάφους, σχετίζεται με την ποιότητα και ποσότητα της οργανικής ουσίας. Το ζωντανό τμήμα του εδάφους κυμαίνεται συνήθως μεταξύ 1 και 5% επί ξηρού βάρους, της συνολικής οργανικής ουσίας (Τζανακάκης, 2020).

Επιπλέον, υπάρχει αυξημένη μικροβιακή δραστηριότητα στη ριζόσφαιρα και όπου υπάρχει βιο-αποδομήσιμη οργανική ουσία (π.χ. φυτικά υλικά, οργανικό υλικό από γεωσκώληκες, περιττώματα ή άλλα οργανικά απόβλητα) αλλά και ευνοϊκές συνθήκες αερισμού, υγρασίας και άλλων, ανάλογα με τα εξειδικευμένα ενδιαίτηματα των μικροοργανισμών.

Πίνακας 16: Ενδεικτικός αριθμός και βιομάζα της πανίδας και χλωρίδας σε επιφανειακούς ορίζοντες του εδάφους (Τζανακάκης, 2020)

Οργανισμοί	Αριθμός ^a		Βιομάζα ^b	
	ανά m ²	ανά gram	kg/ha	g/m ²
Μικροχλωρίδα				
Βακτήρια και Αρχαία	10 ¹⁴ -10 ¹⁵	10 ⁹ -10 ¹⁰	400-5000	40-500
Ακτινοβακτήρια	10 ¹² -10 ¹³	10 ⁷ -10 ⁸	400-5000	40-500
Μύκητες	10 ⁶ -10 ⁸	10-10 ³	1000-15,000	100-1500
Φύκη	10 ⁹ -10 ¹⁰	10 ⁴ -10 ⁵	10-500	1-50
Πανίδα				
Πρωτόζωα	10 ⁷ -10 ¹¹	10 ² -10 ⁶	20-300	2-30
Νηματώδεις	10 ⁵ -10 ⁷	1-10 ²	10-300	1-30
Ακάρεα	10 ³ -10 ⁶	1-10	2-500	0.2-5
Κολέμβοι	10 ³ -10 ⁶	1-10	2-500	0.2-5
Γεωσκώληκες	10-10 ³		100-4000	10-400

Άλλοι
οργανισμοί της
πανίδας

	10^2-10^4			10-100	1-10
--	-------------	--	--	--------	------

^a Για τους μύκητες είναι δύσκολο να διακρίνει κανείς το άτομο, έτσι το μήκος των υφών σε μέτρα χρησιμοποιείται ως δείκτης τους στο έδαφος.

^b Οι μετρήσεις της βιομάζας αφορούν ζωντανό βάρος. Επί ξηρού βάρους τα δεδομένα κυμαίνονται από 20 έως 25% αυτών των τιμών.

Ο εκτιμώμενος αριθμός των βακτηρίων και των αρχαίων, Torsvik et al. (2002).

2.8 Οργανισμοί εδάφους

Οι οργανισμοί μπορούν να ομαδοποιηθούν με βάση το τι χρησιμοποιούν ως υπόστρωμα. Χωρίζονται σε, φυτοφάγους οι οποίοι τρέφονται με φυτά, σαπροφυτικούς οι οποίοι τρέφονται με νεκρά φυτικά υπολείμματα, τα αρπακτικά που τρέφονται με ζώα, οργανισμοί που τρέφονται με μύκητες (fungivores) ή βακτήρια (bacterivores) και οργανισμοί που ζουν εις βάρος κάποιων άλλων οργανισμών (παράσιτα). Οι οργανισμοί ομαδοποιούνται και με βάση τη χρήση ενώσεων για να ικανοποιήσουν τις ανάγκες τους σε άνθρακα και ενέργεια (αυτότροφοι, ετερότροφοι). Οι ετερότροφοι οργανισμοί βασίζονται σε οργανικές ενώσεις για την κάλυψη των αναγκών τους σε άνθρακα και ενέργεια ενώ οι αυτότροφοι έχουν ως πηγή άνθρακα το διοξείδιο του άνθρακα και η απαιτούμενη ενέργειά τους προκύπτει από τη φωτοσύνθεση. Τέλος μπορούν να ομαδοποιηθούν με βάση το μέγεθός τους (Τζανακάκης,2020).

2.8.1 Μικροοργανισμοί

2.8.1.1 Εδαφικοί προκαρυώτες: βακτήρια και αρχαία

Προκαρυώτες χαρακτηρίζονται τα κύτταρα τα οποία δεν έχουν σχηματισμένο πυρήνα. Οι αριθμοί των προκαρυωτών στο έδαφος είναι υψηλοί, κυμαινόμενοι από μερικά δισεκατομμύρια έως πάνω από ένα τρισεκατομμύριο σε κάθε γραμμάριο εδάφους. Βιομάζα 400 με 5000 kg/ha ζώντος βάρους είναι κοινή στα πρώτα 15 cm του εδαφικού προφίλ. Οι προκαρυώτες κυμαίνονται σε μέγεθος από 0,5 έως 5 μm, αρκετά μικρότερο σε διάμετρο από τις περισσότερες μυκητικές υφές. Οι μικρότεροι πλησιάζουν το μέγεθος του μέσου σωματιδίου αργίλου. Υπάρχουν σε διάφορα σχήματα: σχεδόν στρογγυλοί (Coccus), ραβδόσχημοι (Bacillus) ή σπείρες (Spirillum) και πολλοί προκαρυώτες κινούνται, κολυμπώντας μέσω «βλεφαρίδων» (cilia) ή «μαστιγίων» (flagella), ενώ άλλοι αποικίζουν έντονα την πλούσια σε θρεπτικά επιφάνεια των ριζών των φυτών. Είναι είτε αυτότροφοι είτε ετερότροφοι. Οι αυτότροφοι παίρνουν την ενέργειά τους από το φως του ήλιου (φωτοαυτότροφοι) ή από την οξειδωση ανόργανων συστατικών, όπως το αμμώνιο, το θείο και ο σίδηρος (χημιοαυτότροφοι) και τον άνθρακα από το διοξείδιο του άνθρακα ή από διαλυμένα ανθρακικά άλατα. Τα βακτήρια και τα αρχαία, είναι προκαρυώτες, δηλαδή τα κύτταρά τους στερούνται πυρήνα με πυρηνική μεμβράνη. Τα αρχαία είναι εξελικτικά αρκετά διαφορετικά από τα βακτήρια. Οι κυτταρικές μεμβράνες των αρχαίων επιδεικνύουν κύριες χημικές διαφορές από αυτές των βακτηρίων (παράγωγα ισοπρενίου αντί λιπαρών οξέων). Τα περισσότερα βακτήρια στο έδαφος είναι ετερότροφα καθώς η ενέργεια και ο άνθρακας προσλαμβάνονται από την οργανική ουσία.

Η σημασία των προκαρυωτών

Οι προκαρυώτες συμμετέχουν σε καθοριστικές διεργασίες του εδάφους. Τα ετερότροφα βακτήρια, μαζί με τους μύκητες, εμπλέκονται στη διάσπαση της οργανικής ουσίας στο έδαφος (αποδόμηση) επιδρώντας επί της διαθεσιμότητας των θρεπτικών στοιχείων στα ανώτερα φυτά και άλλους οργανισμούς. Οι προκαρυώτες εμπλέκονται σε βιοχημικές

οξειδώσεις και αναγωγές οι οποίες έχουν σημαντικές επιπτώσεις στην περιβαλλοντική ποιότητα, όπως και στη θρέψη των φυτών. Μερικοί αυτότροφοι προκαρυώτες παίρνουν την ενέργειά τους από ανόργανες οξειδώσεις (π.χ. οξείδωση της αμμωνίας από αρχαία και βακτήρια για την παραγωγή νιτρικών και νιτρικών ιόντων).

Οι προκαρυώτες εμπλέκονται στην οξείδωση ή αναγωγή ορισμένων χημικών στοιχείων στα εδάφη. Η προκαρυωτική οξείδωση και αναγωγή των ανόργανων ιόντων, όπως ο σίδηρος και τα μαγγάνιο, επηρεάζουν τη διαθεσιμότητα τους σε άλλους οργανισμούς.

Τα βακτήρια επιτελούν μία σημαντική διεργασία την αζωτοδέσμευση - ο βιοχημικός συνδυασμός του ατμοσφαιρικού αζώτου με το υδρογόνο για το σχηματισμό οργανικών ενώσεων από τα φυτά. Η ενζυματική δραστηριότητα των προκαρυωτών, μπορεί να συνεισφέρει στην επανάκτηση προβληματικών εδαφών (π.χ. ρύπανση από αργό πετρέλαιο, γεωργικά φάρμακα και άλλες οργανικές τοξίνες) (Τζανακάκης,2020).

Ακτινοβακτήρια

Τα ακτινοβακτήρια είναι συχνά ανάμεσα στις πολυπληθέστερες ομάδες των προκαρυωτών και η βιομάζα τους συχνά ξεπερνά αυτή των άλλων βακτηρίων ενώ είναι νηματόμορφοι και συχνά έντονα διακλαδισμένοι. Τα ακτινοβακτήρια ως αερόβιοι ετερότροφοι οργανισμοί, εμπλέκονται στην αποσύνθεση της οργανικής ουσίας του εδάφους, ή ενώσεων που εκκρίνονται από τις ρίζες των φυτών (με ορισμένα είδη να σχηματίζουν παρασιτικές ή συμβιωτικές σχέσεις). Έχουν πολύ σημαντικό ρόλο στην αποικοδόμηση της εδαφικής οργανικής ουσίας και την απελευθέρωση των θρεπτικών της (διασπούν ανθεκτικές ενώσεις, όπως η κυτταρίνη, η χιτίνη και τα φωσφολιπίδια) και είναι πολύ σημαντικοί στα τελευταία στάδια (ωρίμανση) της κομποστοποίησης.

Τα ακτινοβακτήρια αναπτύσσονται καλύτερα σε υγρό, θερμό, καλά αεριζόμενο έδαφος. Ωστόσο, μπορούν να αναπτυχθούν και σε χαμηλό οσμωτικό δυναμικό και είναι δραστήρια σε εδάφη ξηρικών περιοχών, επηρεασμένων από αλατότητα. Μερικά είδη ακτινοβακτηρίων είναι ανθεκτικά σε σχετικά υψηλές θερμοκρασίες. Είναι γενικά μάλλον ευαίσθητοι σε συνθήκες όξινων εδαφών, με άριστη ανάπτυξη σε τιμές pH ανάμεσα σε 6,0 και 7,5. Πολλά είδη ακτινοβακτηρίων, και ιδιαίτερα του γένους *Streptomyces*, παράγουν ουσίες που σκοτώνουν άλλους μικροοργανισμούς (παραγωγή «αντιβιοτικών»).

2.8.1.2 Μύκητες

Οι εδαφικοί μύκητες είναι πολυκύτταροι μικροοργανισμοί που χαρακτηρίζονται από μεγάλη ποικιλότητα (δεκάδες χιλιάδες είδη έχουν αναγνωρισθεί στα εδάφη, αντιπροσωπεύοντας περίπου 170 γένη). Επίσης, εκτιμάται ότι υπάρχουν τουλάχιστον 1 εκατομμύριο είδη μυκήτων στο έδαφος που περιμένουν ακόμη να ανακαλυφθούν. Η συνολική βιομάζα των μυκήτων κυμαίνεται από 1000 μέχρι 15.000 kg/ha στα πρώτα 15 cm του εδαφικού προφίλ (μπορεί να ξεπεράσει ακόμα και τη βιομάζα των βακτηρίων). Οι μύκητες είναι ευκαρυώτες με πλήρως σχηματισμένο πυρήνα, μεμβράνη και κυτταρικά τοιχώματα. Είναι ετερότροφοι, δηλαδή χρησιμοποιούν οργανικά υλικά ως πηγές ενέργειας και άνθρακα. Είναι αερόβιοι οργανισμοί, ωστόσο υπάρχουν είδη τα οποία αναπτύσσονται σε χαμηλές συγκεντρώσεις οξυγόνου και υψηλά επίπεδα διοξειδίου του άνθρακα σε υγρά ή συμπιεσμένα εδάφη.

Οι μύκητες στο έδαφος μπορούν να χωριστούν σε τρεις ομάδες: (1) ζύμες, (2) μούχλες και (3) μύκητες μανιταριών. Οι ζύμες, οι οποίες είναι μονοκύτταροι οργανισμοί, ζουν κυρίως σε πλημμυρισμένα, αναερόβια εδάφη. Οι μούχλες και τα μανιτάρια είναι νηματοειδείς μύκητες, επειδή χαρακτηρίζονται από μακριές, νηματόμορφες, διακλαδιζόμενες αλυσίδες κυττάρων. Ξεχωριστά μυκηλιακά νημάτια, ονομάζονται υφές, τα οποία όταν περιπλέκονται σχηματίζουν μυκήλια. Οι νηματοειδείς μύκητες αναπαράγονται μέσω σπορίων, που συχνά σχηματίζονται σε καρποφορίες. Οι μούχλες μπορούν να αναπτυχθούν σε ένα ευρύ φάσμα εδαφικού pH (όξινα, ουδέτερα ή αλκαλικά εδάφη; Υπάρχουν είδη που ευνοούνται από χαμηλό pH). Τέσσερα από τα πλέον κοινά γένη είναι τα *Penicillium*, *Mucor*, *Fusarium* και *Aspergillus* (Τζανακάκης, 2020).

Οι δραστηριότητες και η σημασία των μυκήτων

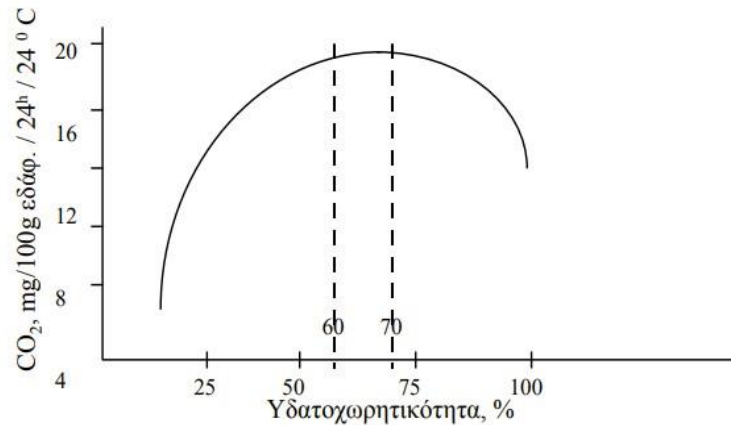
Οι ετερότροφοι μικροοργανισμοί αποικοδομούν το οργανικό υλικό του εδάφους, δηλαδή κυτταρίνες-ημικυτταρίνες, άμυλο, ρητίνες λιγνίνη, καθώς και πρωτεΐνες και σάκχαρα. Επιπλέον, συμμετέχουν στο σχηματισμό οργανικών ουσιών, επιπρόσθετα απ' όσους σχετίζονται με τον εδαφικό χούμο (οργανικά οξέα; οξικό οξύ, φουλβικά οξέα κ.α. Γενικά, οι μύκητες θεωρούνται αρκετά αποτελεσματικοί σε ότι αφορά τη χρήση και αξιοποίηση των οργανικών υλικών. Μέχρι και το 50% από τις ουσίες που αποικοδομούνται από μύκητες μπορεί να γίνουν, σε σύγκριση με το περίπου 20% για τα βακτήρια. Οι μύκητες παίζουν σημαντικό ρόλο στις διεργασίες χουμοποίησης και μετατροπής των οργανικών ουσιών σε ανόργανες καθώς επίσης επιδρούν θετικά στην βελτίωση της δομής του εδάφους (σταθεροποίηση των συσσωματωμάτων). Διαμέσου των παραπάνω διεργασιών ενισχύεται η κυκλοφορία και η διαθεσιμότητα των θρεπτικών βελτιώνοντας τη γονιμότητα του εδάφους. Επιπρόσθετα, μπορούν και αποικοδομούν σύνθετα οργανικά υλικά διευρύνοντας τις κρίσιμες διεργασίες αποσύνθεσης, χουμοποίησης και ανοργανοποίησης εκεί όπου αρκετά βακτήρια και τα ακτινοβακτήρια αδυνατούν να συνεισφέρουν. Οι μύκητες παράγουν χημικές ουσίες (μυκοτοξίνες) που είναι τοξικές για τα φυτά ή τα ζώα (συμπεριλαμβανομένων και των ανθρώπων). Τέλος, προκαλούν σοβαρές ασθένειες στα φυτά.

2.8.1.3 Παράγοντες που επιδρούν στην ανάπτυξη και τη δραστηριότητα των μικροοργανισμών του εδάφους

Όπως σε κάθε οικοσύστημα έτσι και στο εδαφικό, υπάρχουν περιοριστικοί παράγοντες της δραστηριότητας των οργανισμών. Οι φυσικές και οι χημικές ιδιότητες των εδαφών μπορούν να ενεργήσουν ως περιοριστικοί παράγοντες στη χωροκατανομή, το μέγεθος και τη δραστηριότητα των πληθυσμών των οργανισμών που ζουν μέσα στο έδαφος και κατά συνέπεια μπορούν να επηρεάσουν πολύ τον ρυθμό των βιολογικών διεργασιών στο έδαφος. Γενικά, οι περιοριστικοί αυτοί παράγοντες στο εδαφικό οικοσύστημα είναι (Burns & Martin, 1986):

1. Νερό: Η περιεκτικότητα του εδάφους σε νερό επηρεάζει τον αερισμό του, το ποσό και το είδος των διαλυμένων αλάτων στην υγρή φάση του εδάφους και επομένως επηρεάζει έμμεσα τη διαθεσιμότητά τους για τους οργανισμούς, την ωσμωτική πίεση

και το pH του. Γενικά, η διαλυτότητα των διαφόρων ουσιών στο εδαφικό νερό ποικίλλει πάρα πολύ, επηρεάζοντας έτσι τη βιολογική διαθεσιμότητά τους. Για παράδειγμα, τα νιτρικά άλατα έχουν μεγαλύτερη διαλυτότητα στο εδαφικό νερό σε σχέση με τα φωσφορικά και αυτό εξηγεί τη μικρότερη βιολογική διαθεσιμότητα των δεύτερων. Όταν η υγρασία του εδάφους κυμαίνεται μεταξύ 50 και 70% της υδατοϊκανότητάς του, θεωρείται πολύ ευνοϊκή για τις περισσότερες βιολογικές διεργασίες στο έδαφος. Ειδικά για τη νιτροποίηση, θεωρείται ότι η ευνοϊκότερη περιοχή περιεκτικότητας του εδάφους σε νερό είναι το 60% της υδατοϊκανότητάς του, ενώ για την αμμωνιοποίηση το αντίστοιχο ποσοστό είναι 80% (Εικόνα 4).

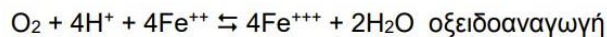
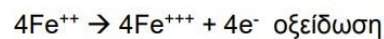
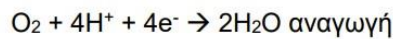


Εικόνα 3: Επίδραση της εδαφικής υγρασίας στη βιολογική δραστηριότητα των μικροοργανισμών (βάθος: 0-20 cm) (Σιδηράς 1992)

2. Αερισμός: Όλοι οι παράγοντες που επηρεάζουν αρνητικά την παρουσία του οξυγόνου στο εδαφικό πορώδες, μειώνουν τις δυνατότητες πολλαπλασιασμού και δραστηριοποίησης των αερόβιων μικροοργανισμών στο έδαφος, γεγονός που τελικά δεν βοηθάει την αποικοδόμηση των οργανικών ουσιών. Όταν στο έδαφος επικρατούν αναερόβιες συνθήκες τότε ευνοείται η απώλεια αζώτου με αέρια μορφή, αλλά και παράγονται διάφορα αέρια όπως μεθάνιο, υδρόθειο και αιθυλένιο, όπως για παράδειγμα συμβαίνει σε βαριά αργιλώδη εδάφη με υψηλή περιεκτικότητα σε νερό, όπου η περιεκτικότητά τους σε CO₂ μπορεί να φθάσει και το 10%.
3. Θερμοκρασία: Η θερμοκρασία γενικά επηρεάζει τον ρυθμό των φυσιολογικών αντιδράσεων των κυττάρων των οργανισμών του εδάφους καθώς και τα φυσικοχημικά γνωρίσματά του, όπως για παράδειγμα το δυναμικό οξειδοαναγωγής, τη διάχυση, την πυκνότητα, τη δομή του νερού κ.ά. Αλλαγές στη θερμοκρασία του εδάφους έχουν σοβαρές επιδράσεις στη δραστηριότητα των οργανισμών. Ο κάθε οργανισμός έχει μια ελάχιστη, μια μέγιστη και μια βέλτιστη τιμή θερμοκρασίας για ανάπτυξη. Για τους περισσότερους μικροοργανισμούς η ανάπτυξη αναστέλλεται στους 0°C εκτός από μερικά ψυχρόφιλα βακτήρια.
4. pH: Οι πληθυσμοί ορισμένων μικροοργανισμών αυξάνουν περισσότερο σε ουδέτερο εδαφικό pH (6,5-7,5). Στην κατηγορία αυτή ανήκουν τα βακτήρια, ενώ οι

ακτινομύκητες ευνοούνται σε αλκαλικό εδαφικό pH (8-9). Αντίθετα, η αύξηση των μυκήτων δεν παρεμποδίζεται σε όξινο εδαφικό περιβάλλον. Αυτός είναι και ο λόγος που οι μύκητες αναπτύσσουν μεγαλύτερους πληθυσμούς σε εδάφη με χαμηλό pH (<6,0) σε σχέση με τα βακτήρια και τους ακτινομύκητες.

5. Δυναμικό Οξειδοαναγωγής: Οι οξειδοαναγωγικές αντιδράσεις είναι μεγάλης σημασίας για την ερμηνεία των χημικών και βιολογικών φαινομένων που συμβαίνουν στο έδαφος. Ένα παράδειγμα μιας τέτοιας βιολογικής αντίδρασης είναι η αερόβια οξείδωση οργανικών ουσιών, όπου δότης ηλεκτρονίων είναι οι οργανικές ουσίες, όπως η γλυκόζη, και τελικός δέκτης ηλεκτρονίων είναι το μοριακό οξυγόνο το οποίο ανάγεται σε νερό. Ένα άλλο παράδειγμα αντίδρασης οξειδοαναγωγής είναι αυτή που καταλήγει στην αναγωγή του οξυγόνου και στην οξείδωση του σιδήρου ως ακολούθως:



Την παραπάνω αντίδραση στο έδαφος μπορεί να την προωθήσει το βακτήριο *Thiobacillus ferrooxidans*.

6. Ικανότητα Ανταλλαγής Κατιόντων (C.E.C.): Οι μικροοργανισμοί του εδάφους επηρεάζονται από τη C.E.C του εδάφους. Σε εδάφη με υψηλή C.E.C διεγείρεται ο μεταβολισμός των βακτηρίων λόγω της υψηλής ρυθμιστικής ικανότητας του εδαφικού διαλύματος. Σε εδάφη με μεγάλη C.E.C αναστέλλεται ο μεταβολισμός των αερόβιων πληθυσμών μυκήτων λόγω της περιοδικά περιορισμένης διάχυσης οξυγόνου.
7. Φως: Στην περίπτωση των φωτοσυνθετικών οργανισμών, η ένταση του φωτός μπορεί να αποτελέσει περιοριστικό παράγοντα. Σε συνθήκες ανεπάρκειας φωτός, τα βακτήρια του γένους *Rhizobium* (τα οποία δεσμεύουν ατμοσφαιρικό άζωτο) δεν παράγουν αρκετή αμμωνία, η οποία είναι απαραίτητη για τον μεταβολισμό τους. Σε συνθήκες όμως άφθονου φωτισμού αυξάνεται υπερβολικά η παραγωγή αμμωνίας, με αποτέλεσμα να παρατηρούνται συμπτώματα έλλειψης αζώτου στα βακτήρια αυτά, επειδή δεν μπορούν να αυξήσουν τον ρυθμό δέσμευσης ατμοσφαιρικού αζώτου.
8. Θρεπτικά συστατικά: Όταν στο έδαφος παρατηρείται έλλειψη θρεπτικών στοιχείων (π.χ. N, P, Ca), ο αριθμός των οργανισμών και το μέγεθος των πληθυσμών τους μειώνεται. Για παράδειγμα, σε εδάφη όπου παρατηρείται έλλειψη ασβεστίου παρατηρείται μείωση των γαιοσκωλήκων και άλλων ειδών της μικροπανίδας. Στα παραπάνω εδάφη ο ρυθμός αποικοδόμησης της οργανικής ουσίας είναι βραδύς και έτσι η οργανική ουσία συσσωρεύεται στην επιφάνεια του εδάφους.

2.8.1.4 Πρακτικές διαχείρισης των εδαφικών μικροοργανισμών

Οι αλλαγές στο περιβάλλον επηρεάζουν τον αριθμό και το είδος των εδαφικών οργανισμών.

- ✓ **Μεταβολή στο οικοσύστημα:** Η αποψίλωση δασών ή λειμώνων για καλλιέργεια μεταβάλλει δραστικά το εδαφικό περιβάλλον.
- ✓ **Αλλαγές στις καλλιέργειες και τις καλλιεργητικές τεχνικές:** Η εντατική εδαφοκαλλιέργεια και η μονοκαλλιέργεια μειώνουν γενικά την ποικιλότητα και την αφθονία των εδαφικών οργανισμών.

Η εδαφοκαλλιέργεια, συνιστά δραστική διαταραχή του οικοσυστήματος, διαταράσσοντας τα δίκτυα μυκητιακών υφών, τις στοές των γεωσκωλήκων κ.α. επιταχύνοντας την απώλεια οργανικής ύλης. Η προσθήκη ζωικής κοπριάς ή κομπόστας διεγείρει ακόμη μεγαλύτερη δραστηριότητα των μικροβίων και της πανίδας.

Στον Πίνακα 16 αναφέρονται οι πρακτικές διαχείρισης του εδάφους οι οποίες έχουν αρνητικό και θετικό αντίκτυπο στη βιοποικιλότητα.

Πίνακας 17: Διαχειρίσεις εδάφους που επηρεάζουν τη βιοποικιλότητα

Μείωση βιοποικιλότητας και πληθυσμών	Αύξηση βιοποικιλότητας και πληθυσμών
Υποκαπνιστικά	Ισορροπημένη χρήση λιπασμάτων
Νηματωδοκτόνα	Ασβέστωση σε όξινα εδάφη
Ορισμένα εντομοκτόνα	Σωστή άρδευση
Συμπύεση	Βελτιωμένη στράγγιση και αερισμός
Διάβρωση	Ζωικές κοπριές και κομπόστ
Βιομηχανικά απόβλητα και βαρέα μέταλλα	Οικιακή (καθαρή) λυματολάσπη
Όργανο-σβάρνισμα	Ελαττωμένη ή μηδενική εδαφοκαλλιέργεια
Μονοκαλλιέργεια	Αμειψισπορά καλλιεργειών
Σκαλιστικές καλλιέργειες	Βοσκότοποι αγρωστών-ψυχανθών
Γυμνή αγρανάπαυση	Καλλιέργειες εδαφοκάλυψης
Καύση ή απομάκρυνση υπολειμμάτων	Επιστροφή υπολειμμάτων στην εδαφική επιφάνεια
Πλαστικά εδαφοκάλυψης	Οργανικές εδαφοεπικαλύψεις

2.8.2 Μέσο και μακρο πανίδα

Η πανίδα περιλαμβάνει τα ζώα (συμπεριλαμβανομένων των μονοκύτταρων πρώτιστων). Η **πανίδα** του εδάφους διαφέρει ως προς το μέγεθός της και διακρίνεται στη **μακροπανίδα**, που περιλαμβάνει τους μεγαλύτερους σε μέγεθος οργανισμούς (όπως οι τυφλοπόντικες, οι γεωσκώληκες), στη **μεσοπανίδα** (όπως τα έντομα, ακάρεα, γαιοσκώληκες) και στη **μικροπανίδα** (όπως οι νηματώδεις, πρωτόζωα).

Μεσοπανίδα (Μικροαρθρόποδα)

Η εδαφική μεσοπανίδα και κυρίως τα μικροαρθρόποδα (Κολλέμβολα και Ακάρεα) είναι ευαίσθητοι βιοδείκτες διαφόρων εδαφικών διαταραχών. Σε μία έρευνα της επίδρασης του γεωργικού φαρμάκου Aldicarb στους πληθυσμούς διαφόρων ειδών κολλέμβολων και ακάρεων στο έδαφος, διαπιστώθηκαν σημαντικές διαφορές ως προς τον χρόνο επαναφοράς των αρχικών ειδών και ως προς την ποικιλότητα των ειδών των μικροαρθροπόδων αυτών στο έδαφος μετά από 3 έτη (Koechler 1992). Όμως για λόγους που μέχρι σήμερα δεν έχουν διευκρινισθεί, η μειωμένη κατεργασία του εδάφους οδήγησε σε αύξηση των φυσικών εχθρών των αρθροπόδων, όπως είναι τα σκαθάρια και τα αραχνοειδή (Stinner και House 1990).

Μακροπανίδα (Γαιοσκώληκες-Τερμίτες)

Πιο σημαντικά μέλη της εδαφικής μακροπανίδας, θεωρούνται οι γαιοσκώληκες, οι τερμίτες και τα μυρμήγκια. Οι τερμίτες και τα μυρμήγκια απαντούν συνήθως σε πολύ μεγάλους πληθυσμούς στις τροπικές και υποτροπικές κλιματικές ζώνες. Οι γαιοσκώληκες είναι πολύ ευαίσθητοι δείκτες των εδαφικών συνθηκών. Επειδή ευνοούνται σε συνθήκες μειωμένης κατεργασίας του εδάφους και δεν αντέχουν στα γεωργικά φάρμακα και το χαμηλό εδαφικό pH. Χρησιμοποιούνται ως ένδειξη των επιπέδων του pH καθώς και των μεγάλων συγκεντρώσεων υπολειμμάτων γεωργικών φαρμάκων στο έδαφος. Οι γαιοσκώληκες λόγω της μεγάλης ευεργετικής επίδρασής τους επί των ιδιοτήτων του εδάφους, θεωρούνται ως ένδειξη καλής εδαφικής υγείας και παραγωγικότητας του εδάφους (Lal 1988).

Πίνακας 18: Γενική κατάταξη σύμφωνα με το μέγεθος σημαντικών ομάδων οργανισμών του εδάφους

Γενικευμένη ομαδοποίηση (πλάτος σώματος σε mm)	Κύριες ομάδες ταξινόμησης	Παράδειγμα
Μακροπανίδα (>2mm) Όλοι ετερότροφοι, κυρίως φυτοφάγοι και σαπροφυτικοί	Σπονδυλωτά Αρθρόποδα	Τρωκτικά, ποντικοί, τυφλοπόντικες Μυρμήγκια, σκαθάρια, προνύμφες, σκουλήκια, αράχνες, τερμίτες
	Δακτυλιοσκώληκες Μαλάκια	Γεωσκώληκες Σαλιγκάρια, γυμνοσάλιαγκες
Μακροχλωρίδα Κυρίως αυτότροφοι	Ανώτερα φυτά Βρυόφυτα	Ριζικό σύστημα φυτών Βρύα
Μεσοπανίδα (0.1-2mm) Όλοι ετερότροφοι, κυρίως σαπροφυτικοί Όλοι ετερότροφοι, κυρίως θηρευτές	Αρθρόποδα	Ακάρεα, κολλέμβολα
	Δακτυλιοσκώληκες Αρθρόποδα	Enchytraoid worms Ακάρεα, πρότουρα
Μικροπανίδα (<0.1mm) Σαπροφυτικοί, αρπακτικά, fungivores, bacterivores	Νηματώδεις Τροχόζωα Πρωτόζωα Βραδύπορα	Νηματώδεις Τροχόζωα Αμοιβάδες, βλεφαριδοφόρα, μαστιγοφόρα Βραδύπορο
Μικροχλωρίδα (<0.1mm) Κυρίως αυτότροφοι	Ανώτερα φυτά Φύκη	Ριζικά τριχίδια Πράσινα, κιτρινο-πράσινα, διάτομα

Κυρίως ετερότροφοι
Ετερότροφοι και
αυτότροφοι

Μύκητες	Ζύμες, ωίδια, μούχλες, σκωριάσεις, μανιτάρια
Βακτήρια	Αερόβια, αναερόβια
Κυανοβακτήρια	Κυανο-πράσινα φύκη, αυτότροφα
Ακτινοβακτήρια	Πολλά είδη ακτινοβακτηρίων, ετερότροφα
Αρχαία	Μεθανότροφα, <i>Thermoplasma</i> sp., αλόφιλα

Η παρουσία των γαιοσκωλήκων στα εδάφη

Οι γαιοσκώληκες είναι σημαντικοί ζωικοί οργανισμοί του εδάφους οι οποίοι τρέφονται με οργανικά υπολείμματα, με την οργανική ουσία του εδάφους και τους μικροοργανισμούς. Δεν τρέφονται με το ριζικό σύστημα των φυτών για αυτό και δεν συγκαταλέγονται στους εχθρούς των καλλιεργειών. Ευδοκιμούν σε ποικιλία εδαφών, ωστόσο προτιμούν τα υγρά πλούσια σε οργανική ουσία, ελαφρώς όξινα έως ελαφρώς αλκαλικά εδάφη (pH 5.5 - 8.5) πλούσια σε ασβέστιο. Ζουν και αναπτύσσονται σε αερόβιες συνθήκες. Στους αποτρεπτικούς παράγοντες περιλαμβάνονται η υψηλή περιεκτικότητα σε άμμο, τα αμμωνιακά λιπάσματα, τα εντομοκτόνα (ειδικά τα καρβαμικά) και η κατεργασία του εδάφους.

Σε σχετικά πρόσφατη καταγραφή αναφέρονται περί τα 7000 περίπου είδη γαιοσκωλήκων τα οποία κατηγοριοποιούνται σε διάφορες ομάδες ανάλογα με το τρόπο κίνησής τους στο έδαφος και τους βιοτόπους τους. Υπάρχουν οι επίγειοι γαιοσκώληκες, περιλαμβάνεται το είδος *Eisenia foetida*, και οι ενδόγειοι γαιοσκώληκες, όπως το *Allolobophora caliginosa* (γνωστό ως «κόκκινο σκουλήκι») που ζει στα πρώτα 10 με 30 εκατοστά του εδαφικού προφίλ. Οι γαιοσκώληκες δημιουργούν ένα πολύπλοκο και εκτεταμένο πλέγμα από στοές μέσα στο έδαφος. Οι στοές περιέχουν τις εκκρίσεις, οργανικές ενώσεις οι οποίες ρυθμίζουν την μικροβιακή δραστηριότητα του εδάφους. Επιπλέον, συμμετέχουν στην αποδόμηση των οργανικών υλικών και στην ανάμειξή τους με τα ανόργανα συστατικά του εδάφους. Οι εκκρίσεις τους είναι οργανικές ενώσεις οι οποίες ρυθμίζουν την μικροβιακή δραστηριότητα του εδάφους ενώ η δραστηριότητα των γαιοσκωλήκων συμβάλλει επίσης στη βελτίωση της γονιμότητας και της παραγωγικότητας του εδάφους, μέσω της αύξησης της διαθεσιμότητας των θρεπτικών στοιχείων και τη βελτίωση των χαρακτηριστικών του εδάφους (αερισμός, πορώδες, καλύτερη δομή), κυρίως στο επιφανειακό στρώμα (έως 35 cm). Τέλος, συνεισφέρουν στην αύξηση της διαθεσιμότητας των θρεπτικών στοιχείων για τα φυτά, κυρίως μέσω της απελευθέρωσης θρεπτικών στοιχείων από την οργανική ουσία, την αυξημένη μικροβιακή δραστηριότητα, διευκόλυνση πρόσβασης του ριζικού συστήματος σε νέους πόρους και απελευθέρωση θρεπτικών από την αποσύνθεσή τους.

Πίνακας 19: Χαρακτηριστικά απορριμμάτων γαιοσκωλήκων

Χαρακτηριστικό	Εκκρίσεις γαιοσκωλήκων	Εδάφη
Ιλύς και άργιλος, %	38.8	22.2
Φαινόμενη πυκνότητα, Mg/m ³	1.11	1.28
Δομική σταθερότητα ^a	849	65
Ικανότητα ανταλλαγής κατιόντων, cmol/kg	13.8	3.5
Ανταλλάξιμο Ca ²⁺ , cmol/kg	8.9	2.0
Ανταλλάξιμο K ⁺ , cmol/kg	0.6	0.2
Διαλυτός P, ppm	17.8	6.1
Ολικό N, %	0.33	0.12

^aΑριθμός των σταγόνων νερού που απαιτείται για την καταστροφή των δομικών συσσωματωμάτων.

2.8.3 Εδαφική μικροπανίδα: Νηματώδεις & Πρωτόζωα

Τα πρωτόζωα και οι νηματώδεις, όπως έχει ήδη αναφερθεί, παίζουν καίριο ρόλο στο εδαφικό οικοσύστημα ως άρπαγες. Συνήθως τα είδη και τα πληθυσμιακά τους μεγέθη στο έδαφος αντανakλούν και τους αντίστοιχους πληθυσμούς των βακτηρίων και των μυκήτων. Έτσι, εδάφη αδιατάρακτα με μικροχλωρίδα στην οποία κυριαρχούν οι μύκητες, παρουσιάζουν υψηλούς πληθυσμούς μυκητοφάγων νηματωδών, ενώ καλλιεργούμενα εδάφη, όπου κυριαρχούν τα βακτήρια, παρουσιάζουν υψηλούς πληθυσμούς βακτηριοφάγων νηματωδών. Επίσης, πολλά πρωτόζωα και νηματώδεις περιορίζουν τους πληθυσμούς φυτοπαθογόνων μυκήτων και βακτηρίων στο έδαφος, ενώ υπάρχουν και περίπου 500 είδη νηματωδών που είναι παράσιτα των φυτών (Hendrix κ.ά 1986, Pankhurst 1994).

Οι νηματώδεις βρίσκονται στα εδάφη σε υψηλούς πληθυσμούς και ποικιλότητα (έχουν καταγραφεί περίπου 20.000 είδη, από τα 100.000 που υπολογίζεται ότι υπάρχουν). Ευδοκιμούν σε υγρά, καλά αεριζόμενα εδάφη με καλή δομή ή ακόμη και σε αμμώδη εδάφη. Σε ξηρικές συνθήκες οι νηματώδεις πέφτουν σε κρυπτοβιωτική ή λανθάνουσα κατάσταση, (δεν χρησιμοποιούν ανιχνεύσιμο οξυγόνο για αναπνοή). Οι νηματώδεις τρέφονται με μύκητες, βακτήρια και άλγη, ή κυνηγούν άλλους νηματώδεις και πρωτόζωα. Η δραστηριότητα των νηματωδών συχνά ενισχύει την απελευθέρωση του διαθέσιμου στα φυτά αζώτου στο έδαφος (30 με 40% του αζώτου που απελευθερώνεται σε κάποια οικοσυστήματα). Συγκεκριμένα είδη είναι φυτοπαράσιτα, ιδιαίτερα αυτοί του γένους *Heterodera*, οι οποίοι προσβάλουν τις ρίζες των φυτικών ειδών και προκαλούν πληγές που επιτρέπουν μόλυνσεις από δευτερογενή παθογόνα. Επίσης, προκαλούν τον σχηματισμό όγκων στις ρίζες.

Τα πρωτόζωα με περίπου 50,000 είδη, παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη ποικιλότητα της εδαφικής μικροπανίδας. Συνήθως είναι μεγαλύτερα από τα βακτήρια (διάμετρο 4 έως 250 μm) και δεν διαθέτουν πραγματικό κυτταρικό τοίχωμα. Τα πρωτόζωα του εδάφους περιλαμβάνουν τις αμοιβάδες, τα βλεφαριδοφόρα και τα μαστιγοφόρα. Επιπρόσθετα,

προτιμούν γενικά υγρά, καλά αποστραγγιζόμενα εδάφη και βρίσκονται σε μεγαλύτερους αριθμούς στους επιφανειακούς ορίζοντες και είναι ιδιαίτερα δραστήρια στην περιοχή γύρω από τις ρίζες των φυτών. Τα πρωτόζωα στο έδαφος θηρεύουν βακτήρια.

2.8.4 Ένζυμα εδάφους

Τα εδαφικά ένζυμα είναι βιολογικοί καταλύτες πολυάριθμων αντιδράσεων που συμβαίνουν στο έδαφος. Από τα ένζυμα του εδάφους, ορισμένα (π.χ. αφυδρογονάση) βρίσκονται μόνο σε ζωντανά κύτταρα, ενώ τα περισσότερα μπορούν να υπάρχουν και ως εξωένζυμα εκκρινόμενα από διάφορους μικροοργανισμούς του εδάφους ή ως ένζυμα προερχόμενα από μικροβιακά και φυτικά υπολείμματα. Και στις δύο περιπτώσεις τα ένζυμα του εδάφους είναι σταθεροποιημένα σε μορφή συμπλόκων με τα ορυκτά της αργίλου ή με τα κολλοειδή συστατικά της οργανικής ουσίας. Επειδή είναι δύσκολη η εξαγωγή των ενζύμων τους από το έδαφος, τα ένζυμα αυτά μελετώνται έμμεσα με μέτρηση της δραστηριότητάς τους *in vitro* σε αυστηρά ελεγχόμενες συνθήκες. Ωστόσο, η αναγωγή των συμπερασμάτων των μετρήσεων αυτών από την *in vitro* κατάσταση στην *in vivo* παρουσιάζει αρκετές δυσκολίες. Γενικά, οι μετρήσεις της δραστηριότητας των ενζύμων του εδάφους, μας παρέχουν γνώσεις σχετικά με τις βιοχημικές διεργασίες, που πραγματοποιούνται στο έδαφος και έτσι αποτελούν χρήσιμους δείκτες της βιολογικής δραστηριότητας στο έδαφος (Dick 1992).

Τα εδαφικά ένζυμα ουρεάση, αμιδάση, φωσφατάση, άμυλο-σουλφατάση, πρωτεάση, αφυδρογονάση και ινβεργάση βρέθηκαν σε αρκετά υψηλές συγκεντρώσεις σε εδάφη με μειωμένη εδαφική κατεργασία, καθώς και σε εδάφη, στα οποία εφαρμόζονταν αμειψισπορά, σε σύγκριση με εδάφη συστημάτων μονοκαλλιέργειας (Dogan 1980, Dick 1984, Gurta και Germida 1988). Το ίδιο παρατηρήθηκε και στην περίπτωση της ενσωμάτωσης φυτικών υπολειμμάτων στο έδαφος (Bolton κ.ά. 1985).

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων της δραστηριότητας των εδαφικών ενζύμων σε συνδυασμό με μετρήσεις της εδαφικής βιομάζας μεταβάλλονται κάτω από διαφορετικά συστήματα διαχείρισης του εδάφους, κάτι που δεν έδειξαν οι μετρήσεις μόνο της εδαφικής βιομάζας. Επομένως, οι μετρήσεις της δραστηριότητας ορισμένων εδαφικών ενζύμων μπορούν να αποτελέσουν βιοδείκτη για την ανίχνευση μεταβολών της εδαφικής ποιότητας.

2.9 Δείκτες ποιότητας εδάφους

Ένας δείκτης εδαφικής ποιότητας θα μπορούσε να οριστεί ως το ελάχιστο σύνολο παραμέτρων που, όταν συσχετίζονται, παρέχουν αριθμητικά στοιχεία όσον αφορά στην ικανότητα ενός εδάφους να πραγματοποιεί μια ή περισσότερες λειτουργίες. Ένας δείκτης εδαφικής ποιότητας είναι, συνεπώς, μια μετρήσιμη ιδιότητα που επηρεάζει την ικανότητα ενός εδάφους να πραγματοποιεί μια δεδομένη λειτουργία (Acton & Padbury, 1993). Όλες οι μελέτες για τους δείκτες εδαφικής ποιότητας καταδεικνύουν την πολυπλοκότητα του θέματος καθώς μια ποικιλία φυσικών, χημικών, μικροβιολογικών και βιοχημικών ιδιοτήτων θα πρέπει να ληφθούν υπόψη (F. Bastida et al., 2008)

Οι δείκτες ποιότητας του εδάφους μπορεί να είναι φυσικές, χημικές ή βιολογικές ιδιότητες, διεργασίες και χαρακτηριστικά που μπορούν να μετρηθούν για τον έλεγχο των μεταβολών στο έδαφος. Οι πιο χρήσιμοι τύποι δεικτών εξαρτώνται από τις λειτουργίες του εδάφους για τις οποίες αξιολογούνται. Οι λειτουργίες αυτές περιλαμβάνουν:

- την παροχή ενός φυσικού, χημικού και βιολογικού περιβάλλοντος για τους ζωντανούς οργανισμούς
- τη ρύθμιση και το διαχωρισμό της ροής του νερού, την αποθήκευση και ανακύκλωση των θρεπτικών ουσιών και άλλων στοιχείων
- την ενίσχυση της βιολογικής δραστηριότητας και την ποικιλομορφία στη φυτική και ζωική παραγωγικότητα
- τη διύλιση, την αποθήκευση, την υποβάθμιση, τη σταθεροποίηση και την αποτοξίνωση οργανικών και ανόργανων υλικών και
- την παροχή μηχανικής υποστήριξης για τους ζωντανούς οργανισμούς και τις δομές τους.

Η ποιότητα του εδάφους καθορίζεται από την παρατήρηση ή τη μέτρηση διάφορων ιδιοτήτων ή διεργασιών. Καμία εδαφική παράμετρος δεν μπορεί από μόνη της να αποτελέσει δείκτη της εδαφικής ποιότητας. Οι δείκτες της ποιότητας του εδάφους μπορούν να διακριθούν σε τέσσερις γενικές ομάδες: *σε οπτικούς, φυσικούς, χημικούς, βιολογικούς και βιοχημικούς δείκτες.*

Οι *οπτικοί δείκτες* προκύπτουν από την παρατήρηση ή τη φωτογραφική ερμηνεία. Η εικόνα του εδάφους, η αλλαγή στο εδαφικό χρώμα, η συγκέντρωση, η απορροή, οι αυλακώσεις, η βλάστηση, τα είδη ζιζανίων και η απόθεση είναι μερικά μόνο παραδείγματα τέτοιων δεικτών. Τα οπτικά στοιχεία μπορεί να αποτελέσουν σαφή ένδειξη για ενδεχόμενη απειλή ή μεταβολή της εδαφικής ποιότητας.

Οι *φυσικοί δείκτες* σχετίζονται με την κατανομή των στερεών μορίων και πόρων. Παραδείγματα φυσικών δεικτών είναι το ειδικό φαινόμενο βάρος, το πορώδες, η συνολική σταθερότητα, η σύσταση και η συμπιεστότητα. Οι φυσικοί δείκτες πρωτίστως απεικονίζουν περιορισμούς στην αύξηση ριζών, διήθηση ή μετακίνηση του ύδατος μέσα στην εδαφοτομή.

Οι *χημικοί δείκτες* περιλαμβάνουν μετρήσεις pH, αλατότητας, ποσοστού οργανικής ουσίας, συγκέντρωσης φωσφόρου, ικανότητας ανταλλαγής κατιόντων, ανακύκλωσης θρεπτικών ουσιών και συγκεντρώσεων στοιχείων που μπορούν να είναι πιθανοί τοξικοί παράγοντες

(βαρέα μέταλλα, ραδιενεργές ενώσεις, κ.λπ.) ή εκείνων που απαιτούνται για την ανάπτυξη των φυτών. Η χημική κατάσταση του εδάφους επηρεάζει τις σχέσεις εδάφους - φυτών, την ποιότητα του ύδατος, την αποθηκευτική ικανότητα, τη διαθεσιμότητα θρεπτικών ουσιών και ύδατος για τα φυτά και τους άλλους οργανισμούς, την κινητικότητα των τοξικών ουσιών και μερικές φυσικές καταστάσεις, όπως την τάση για τη διαμόρφωση σκληρής επιφανειακής στρώσης.

Οι βιολογικοί δείκτες περιλαμβάνουν τις μετρήσεις των μικρο- και μακρο οργανισμών, τη δραστηριότητά τους ή υποπροϊόντα τους. Ο γεωσκώληκας, τα νηματώδη και οι πληθυσμοί τερμιτών έχουν συχνά προταθεί. Ο ρυθμός της αναπνοής μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανίχνευση της μικροβιακής δραστηριότητας, συγκεκριμένα για τη μικροβιακή αποσύνθεση της οργανικής ουσίας του εδάφους. Μετρήσεις των ποσοστών αποσύνθεσης φυτικών υπολειμμάτων ή μετρήσεις των αριθμών σπόρων ζιζανίων ή παθογόνων πληθυσμών μπορούν επίσης να χρησιμεύσουν ως βιολογικοί δείκτες εδαφικής ποιότητας.

Οι βιοχημικοί δείκτες αποδίδουν βιοχημικές ιδιότητες του εδάφους, αλλά δεν υπάρχει ακόμα καμία ευρέως αποδεκτή μέθοδος ως προς τον τρόπο με τον οποίο πρέπει να χρησιμοποιηθούν. Παρατηρώντας τις τάσεις ως προς τη χρήση τους κατά τη διάρκεια της τελευταίας δεκαετίας, γενικά, οι βιοχημικές ιδιότητες αφορούσαν τους βιολογικούς κύκλους των στοιχείων (C, N, P και S) και χρησιμοποιούνταν για τη διάγνωση της ποιότητας του εδάφους. Αυτές οι ιδιότητες περιλαμβάνουν και τις γενικές βιοχημικές παραμέτρους (τον C και το N της μικροβιακής βιομάζας, τη δραστηριότητα αφυδρογονασών και τη δυνατότητα μετατροπής του οργανικού αζώτου σε ανόργανο) και συγκεκριμένες βιοχημικές παραμέτρους (τη δραστηριότητα των υδρολυτικών ενζύμων, όπως η φωσφατάση, η ουρεάση και η β-γλυκοσιδάση). Οι βιοχημικές ιδιότητες μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε μεμονωμένα, ως απλοί δείκτες, είτε σε συνδυασμό χρησιμοποιώντας σύνθετες εξισώσεις που προκύπτουν από μαθηματικούς συνδυασμούς ή από την εφαρμογή στατιστικών προγραμμάτων. (USDA Natural Resources Conservation Service, 1996)

Πίνακας 20: Προτεινόμενη ελάχιστη ομάδα δεικτών της ποιότητας του εδάφους (Mausbach & Tugel 1997)

Δείκτες Εδαφικής Ποιότητας	Σχέση Δεικτών με Εδαφικές Διεργασίες
Φυσικοί Δείκτες	
Κοκκομετρική σύσταση	Κατακράτηση και μεταφορά νερού και χημικών ουσιών Χρήση στην προσομοίωση, διάβρωση & εκτίμηση ποικιλότητας
Βάθος εδάφους, επιφανειακό στρώμα & ριζόστρωμα	Εκτίμηση του δυναμικού παραγωγής και της διάβρωσης Ομαλοποιεί το τοπίο & τη γεωγραφική ποικιλότητα
Διήθηση & Φαινόμενο ειδικό βάρος (SBD)	Δυναμικό έκπλυσης, παραγωγικότητας και διάβρωσης Το SBD χρειάζεται στην προσαρμογή των αναλύσεων σε ογκομετρική βάση
Υδατοϊκανότητα	Συνδέεται με τη συγκράτηση και τη μεταφορά νερού και τη διάβρωση

	Διαθέσιμο H ₂ O, υπολογισμός από SBD, κοκκομετρική σύσταση & OM
Χημικοί Δείκτες	
Οργανική Ουσία (OM)	Καθορίζει τη γονιμότητα, τη σταθερότητα και το εύρος της διάβρωσης Χρήση στην προσομοίωση και την ομαλοποίηση θέσης
pH	Ορίζει τα όρια φυτικής και μικροβιακής δραστηριότητας Βασικό στα ομοιώματα
Ηλεκτρική Αγωγιμότητα	Ορίζει τα όρια φυτικής και μικροβιακής δραστηριότητας Προς το παρόν απουσιάζει από τα ομοιώματα
Αφομοιώσιμο N, P και K	Διαθέσιμα θρεπτικά στοιχεία, και δυναμικό απώλειας N Δείκτες παραγωγικότητας και περιβαλλοντικής ποιότητας
Βιολογικοί Δείκτες	
Μικροβιακή Βιομάζα C & N	Μικροβιακό καταλυτικό δυναμικό & απόθεμα C & N
Δυνητικά Ανοργανοποιησιμο N	Γονιμότητα και δυναμικό εφοδιασμού N Χρήση στα ομοιώματα (αναπληρωματικός δείκτης βιομάζας)
Αναπνοή Εδάφους, περιεχόμενο νερό και θερμοκρασία	Μέτρηση μικροβιακής δραστηριότητας Χρήση στα ομοιώματα, εκτίμηση της δραστηριότητας της βιομάζας

2.9.1 Επιλογή δεικτών

Η επιλογή των δεικτών που θα καταστήσουν δυνατό τον προσδιορισμό της ποιότητας του εδάφους είναι επίσης μεγάλης σημασίας. Κατά την φυσιολογική λειτουργία του εδάφους εμπλέκεται ένα πλήθος φυσικών, χημικών και βιοχημικών παραμέτρων. Ωστόσο, καθώς είναι αδύνατο να ληφθούν υπόψη στο σύνολο τους αυτές οι παράμετροι κατά τη διαδικασία εκτίμησης της εδαφικής ποιότητας, είναι αναγκαίο να γίνει μια κατάλληλη επιλογή αυτών. Οι παράμετροι που θα επιλεγούν θα πρέπει να πληρούν μια σειρά προϋποθέσεων και συγκεκριμένα να παρουσιάζουν:

- ευαισθησία στην παρουσία του μέγιστου αριθμού υποβαθμιστικών παραγόντων
- συνέπεια στην κατεύθυνση της επερχόμενης αλλαγής από ένα δεδομένο τοξικό παράγοντα
- δυνατότητα απεικόνισης των διαφορετικών επιπέδων υποβάθμισης του εδάφους

Σε ότι αφορά στην επιλογή των ιδιοτήτων για τον προσδιορισμό της ποιότητας ενός εδάφους οι Dogan και Parkin (1996) προτείνουν ένα ελάχιστο σετ δεδομένων στο οποίο περιλαμβάνονται φυσικές (σύσταση, βάθος ριζών, ταχύτητα διήθησης, φαινόμενη πυκνότητα, ικανότητα συγκράτησης νερού), χημικές (pH, ολικός άνθρακας, ηλεκτρική αγωγιμότητα, θρεπτικές ουσίες) βιολογικές/βιοχημικές (αναπνοή εδάφους, C και N μικροβιακής βιομάζας) ιδιότητες.

Γενικά, οι φυσικές και οι φυσικοχημικές ιδιότητες τυγχάνουν περιορισμένης χρήσης και αποδοχής καθώς μεταβάλλονται μόνο όταν το έδαφος υφίσταται σημαντικές αλλαγές (Filip, 2002). Αντίθετα, οι βιολογικές και οι βιοχημικές ιδιότητες παρουσιάζουν μεγάλη ευαισθησία σε μικρές εδαφικές μεταβολές (Klein et al., 1985; Nannipieri et al., 1990; Yakonchenko et al., 1996). Ως εκ τούτου, όταν πρόκειται να υπολογιστούν η συνολική αντοχή των φυσικών λειτουργιών του εδάφους και οι διαφορετικές του χρήσεις, βασικούς δείκτες θα πρέπει να αποτελούν βιολογικές και βιοχημικές παράμετροι.

Κατά γενική ομολογία, η επιλογή των δεικτών θα πρέπει να βασίζεται:

- στη χρήση του εδάφους
- στη σχέση μεταξύ ενός δείκτη και τη λειτουργία του εδάφους που αξιολογείται
- στην ευκολία και την αξιοπιστία της μέτρησης
- στην ποικιλία των χρόνων και των περιοχών δειγματοληψίας
- στην ευαισθησία της μέτρησης στις μεταβολές κατά τη διαχείριση του εδάφους
- στη συμβατότητα με τον τυπικό τρόπο δειγματοληψίας και ελέγχου
- στις δεξιότητες που απαιτούνται για τη χρήση και την ερμηνεία των δεικτών.

Ο βέλτιστος χρόνος και η θέση για την παρατήρηση ή τη δειγματοληψία δεικτών εδαφικής ποιότητας εξαρτώνται από τη λειτουργία για την οποία γίνεται η αξιολόγηση. Η συχνότητα μετρήσεων ποικίλλει επίσης σύμφωνα με το κλίμα και την εδαφική χρήση.

Η εδαφική ποικιλότητα σε μια περιοχή, ένα λιβάδι, ένα δάσος ή ένα βιότοπο μπορεί να έχει σημαντικές επιπτώσεις στην επιλογή των δεικτών. Σχετικά με τη λειτουργία, τέτοιοι παράγοντες όπως, η μονάδα του εδαφικού χάρτη ή το στάδιο ανάπτυξης συγκομιδών μπορεί να είναι κρίσιμοι. Για παράδειγμα, τα ίχνη από τις ρόδες των τρακτέρ μπορούν να επηρεάσουν εντυπωσιακά πολλές ιδιότητες που μελετώνται για την παραγωγικότητα των καλλιεργειών. Το ιστορικό των τεχνικών που ακολουθήθηκαν και ακολουθούνται θα πρέπει επίσης να καταγράφεται για την εξασφάλιση μιας έγκυρης ερμηνείας των πληροφοριών.

2.9.2 Ερμηνεία μετρήσεων

Η ερμηνεία των μετρήσεων των δεικτών κατά τον προσδιορισμό της ποιότητας του εδάφους αποτελεί, στις μέρες μας, μια σημαντική πρόκληση για τους ερευνητές. Τα εδάφη και οι τιμές δεικτών τους ποικίλλουν λόγω των διαφορών στο πρωτογενές υλικό, τις κλιματικές συνθήκες, την τοπογραφική θέση, τους οργανισμούς που ζουν στο έδαφος και τον τύπο βλάστησης. Για παράδειγμα, η ικανότητα ανταλλαγής κατιόντων μπορεί να σχετίζεται με την οργανική ουσία, αλλά μπορεί επίσης να συνδέεται με το είδος και την ποσότητα αργίλου.

Οι αλλαγές πρέπει να αξιολογούνται σαν ομάδα, με την αλλαγή σε οποιοδήποτε δείκτη να αξιολογείται μόνο σε σχέση με τις αλλαγές στους υπόλοιπους. Αξιολογήσεις πριν και μετά από, ή με και χωρίς επέμβαση, απαιτούνται επίσης για την ανάπτυξη κατάλληλων και σημαντικών σχέσεων για τα διάφορα είδη εδαφών και των λειτουργιών που αναμένονται από αυτά. Ο γενικός στόχος πρέπει να είναι η διατήρηση ή η βελτίωση της ποιότητας του εδάφους χωρίς να προκαλούνται επιπτώσεις σε άλλους πόρους. (USDA Natural Resources Conservation Service, 1996)

2.10 Επιλογή παραμέτρων εκτίμησης υγείας εδάφους

2.10.1 Χρήση βιοχημικών παραμέτρων

Η ποιότητα του εδάφους ως έννοια, όπως προαναφέρθηκε, έχει διάφορους ορισμούς και ίσως γι' αυτό το λόγο, απέχει πολύ ο ποσοτικός προσδιορισμός της. Σε πολλές μελέτες έχει γίνει ανάλυση της εδαφικής ποιότητας με τη χρήση διαφόρων ιδιοτήτων. Ωστόσο, μόνο λίγες από αυτές έχουν χρησιμοποιήσει τα ληφθέντα αποτελέσματα για την καθιέρωση ενός δείκτη εδαφικής ποιότητας. Επιπλέον, οι λίγοι δείκτες που υπάρχουν δεν έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως. Συνεπώς, δεν υπάρχει κανένας παγκοσμίως εφαρμόσιμος τύπος για τη μέτρηση την εδαφικής ποιότητας. Επισημαίνεται στο σημείο αυτό, ότι είναι σημαντικό να μη γίνεται σύγχυση του δείκτη με τις μεθόδους που χρησιμοποιούνται για να τον καθιερώσουν. Αν και οι μέθοδοι υπάρχουν, οι δείκτες δεν χρησιμοποιούνται ποτέ σε μεγάλη κλίμακα, ούτε ακόμη και σε περιοχές με παρόμοιες κλιματικές, αγρονομικές κ.α. συνθήκες. Τα περισσότερα προβλήματα σχετικά με την εφαρμογή τους σχετίζονται με τη φτωχή τυποποίηση των μεθόδων και με τη χωρική κλίμακα στην οποία μπορούν να εφαρμοστούν. Με αυτή την έννοια, ένας σαφής καθορισμός των συνθηκών στις οποίες έχει αποκτηθεί ένας δείκτης θα πρέπει να ληφθεί υπόψη, έτσι ώστε να μπορεί να εφαρμοστεί τουλάχιστον σε τοπική κλίμακα. Σε αυτήν την περίπτωση ο προσδιορισμός και η χρήση μερικών σημαντικών παραγόντων της υπό μελέτη περιοχή, όπως οι κλιματικές παράμετροι και ο τύπος και η πυκνότητα βλάστησης είναι ουσιαστικής σημασίας για τη μείωση της φτωχής τυποποίησης και για την επίλυση προβλημάτων σχετικά με τη χωρική κλίμακα. Επιπλέον, ένας δείκτης εδαφικής ποιότητας πρέπει ως έναν ορισμένο βαθμό να ορίζεται ως εξαρτώμενος από τη χρήση, έτσι ώστε να μπορεί να εφαρμοστεί σε μεγαλύτερη κλίμακα. Αυτό διευκολύνει την επιλογή ενός ελάχιστου συνόλου δεικτών που μπορεί να εξετάσει τη μέγιστη ικανότητα του εδάφους για μια συγκεκριμένη λειτουργία.

Υπάρχουν τρεις τρόποι προσέγγισης όσον αφορά στη χρήση γενικών και ειδικών βιοχημικών παραμέτρων για τον προσδιορισμό της εδαφικής ποιότητας:

1. Η χρήση μεμονωμένων ιδιοτήτων
2. Η χρήση απλών δεικτών
3. Η χρήση σύνθετων δεικτών που προκύπτουν από το συνδυασμό διαφόρων ιδιοτήτων

Η χρήση μεμονωμένων ιδιοτήτων

Η χρήση μιας μεμονωμένης βιοχημικής ιδιότητας είναι μια κοινή μέθοδος για την εκτίμηση της ποιότητας των εδαφών όταν η έννοια της ποιότητας αναφέρεται αποκλειστικά στην παραγωγική ικανότητα. Στο πλαίσιο αυτό έχουν γίνει πολλές προσπάθειες να βρεθεί μια σχέση μεταξύ της παραγωγικότητας και της τιμής μιας εδαφικής παραμέτρου. Για παράδειγμα, γνωρίζοντας ότι η καλλιέργεια του εδάφους συνήθως μειώνει το οργανικό περιεχόμενο του έγιναν προσπάθειες να προσδιοριστεί η σχέση μεταξύ της περιεκτικότητας σε οργανικές ουσίες και της παραγωγικότητας του εδάφους. Για τον υπολογισμό της ποιότητας του εδάφους, με τη χρήση μεμονωμένων ιδιοτήτων περίπου το 40% του συνόλου των δημοσιευμένων εργασιών χρησιμοποιούν μια γενική παράμετρο ως δείκτη, όπως για

παράδειγμα τον οργανικό C της μικροβιακής βιομάζας, τη δραστηριότητα της αφυδρογονάσης, την αναπνοή του εδάφους, την ικανότητα μετατροπής του οργανικού N σε ανόργανο, το περιεχόμενο σε ATP κ.α. ενώ το υπόλοιπο 60% λαμβάνει υπόψη μια συγκεκριμένη βιοχημική παράμετρο όπως η δραστηριότητα της ουρεάσης (urease) ή της φωσφατάσης (phosphatase). Η χρήση των μεμονωμένων ιδιοτήτων ως δεικτών της εδαφικής ποιότητας αφήνουν διάφορα προβλήματα άλυτα, επιβεβαιώνοντας έτσι αυτά που έχουν επισημανθεί από τους Skujins (1978), Nannipieri et al. (1990) and Nannipieri (1994). Οι μελετητές αυτοί (και πολλοί άλλοι) θεωρούν ότι είναι εννοιολογικά λάθος να υποθέσει κανείς ότι μια μεμονωμένη ενζυμική δραστηριότητα, η οποία απεικονίζει τα ένζυμα που καταλύουν μια συγκεκριμένη αντίδραση στο έδαφος, θα μπορούσε να ληφθεί ως δείκτης για περισσότερες σύνθετες λειτουργίες, όπως η συνολική μικροβιακή δραστηριότητα, η γονιμότητα ή η ποιότητα του εδάφους, οι οποίες εξαρτώνται από πολλές αντιδράσεις και ιδιότητες.

Η χρήση απλών δεικτών

Ο Dalal (1998) πρότεινε ότι οι περιορισμοί που παρουσιάζονται κατά τη χρήση μεμονωμένων δεικτών θα μπορούσαν να αποφευχθούν με τη χρήση απλών δεικτών, δηλαδή σχέσεων μεταξύ δύο βιοχημικών ιδιοτήτων. Η αναλογία μεταξύ των τιμών δύο παραμέτρων αντιπροσωπεύει έναν απλό συνδυασμό δύο διαφορετικών μετρήσεων για ένα ενιαίο κριτήριο (Filip, 2002). Εντούτοις, αυτοί οι δείκτες τυγχάνουν περιορισμένης χρήσης και εκτίμησης για την αξιολόγηση της εδαφικής ποιότητας. Εν περιλήψει, η χρήση των απλών δεικτών για την αξιολόγηση της εδαφικής ποιότητας πάσχει από τους ίδιους περιορισμούς με τη χρήση μεμονωμένων βιοχημικών ιδιοτήτων: την έλλειψη επιπέδων αναφοράς, την έλλειψη συνεπούς συμπεριφοράς της ίδιας αναλογίας στα πειράματα διαφορετικών μελετών, και την έλλειψη αντικειμενικών κριτηρίων για το συσχετισμό μιας μεταβλητής του δείκτη με την τροποποίηση μιας δεδομένης διεργασίας που εμφανίζεται στο έδαφος. Με άλλα λόγια, θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η άποψη των Sojka and Urchurch (1999), ότι η αναζήτηση ενός απλού, προσιτού, εφαρμόσιμου ποιοτικού δείκτη του εδάφους είναι ανέφικτη.

2.10.2 Επιλογή βιοχημικών παραμέτρων

Όπως προαναφέρθηκε, οι φυσικές και φυσικοχημικές ιδιότητες τυγχάνουν περιορισμένης χρήσης και αποδοχής καθώς μεταβάλλονται μόνο όταν το έδαφος υφίσταται σημαντικές αλλαγές (Filip, 2002). Αντίθετα, οι βιολογικές και οι βιοχημικές ιδιότητες παρουσιάζουν μεγάλη ευαισθησία σε μικρές εδαφικές μεταβολές (Klein et al., 1985; Nannipieri et al., 1990; Yakovchenko et al., 1996). Συνεπώς, όταν πρόκειται να υπολογιστούν η συνολική αντοχή των φυσικών λειτουργιών του εδάφους και οι διαφορετικές του χρήσεις, βασικούς δείκτες θα πρέπει να αποτελούν βιολογικές και βιοχημικές παράμετροι, όπως ο προσδιορισμός του C και του N της μικροβιακής βιομάζας, της δραστηριότητας της αφυδρογονάσης και του περιεχομένου σε υδρογονάνθρακες σε εδάφη.

2.10.3 Μικροβιακή βιομάζα

Μεταξύ των γενικών παραμέτρων, ο οργανικός άνθρακας της μικροβιακής βιομάζας θεωρείται ως η πιο αξιόπιστη (41% των μελετών) και ακολουθεί η δραστηριότητα της αφυδρογονάσης (28% των μελετών) και η ικανότητα ανοργανοποίησης του N (16% των μελετών). Η δραστηριότητα της φωσφατάσης (28%), της β- γλυκοσιδάσης (β-glucosidase) (16%) και της ουρεάσης (11%) είναι οι πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες συγκεκριμένες βιοχημικές παράμετροι και στην ουσία αντιπροσωπεύουν τους κύκλους των P, C και N. Ο οργανικός άνθρακας της μικροβιακής βιομάζας και η ικανότητα ανοργανοποίησης του N χρησιμοποιήθηκαν αρχικά στον υπολογισμό των μεταβολών της ποιότητας του εδάφους εξαιτίας διαχειριστικών τεχνικών και χρήσεων, ενώ η δραστηριότητα της αφυδρογονάσης (ως γενικός δείκτης ζωντανών μικροοργανισμών) μελετήθηκε επίσης και σε εδάφη που είχαν ρυπανθεί από βαρέα μέταλλα και εντομοκτόνα, καθώς επίσης και για το βαθμό επαναφοράς των υποβαθμισμένων εδαφών.

Η μικροβιακή βιομάζα αντιπροσωπεύει το ζωντανό τμήμα της οργανικής ουσίας του εδάφους, εκτός από τα ζώα και τις ρίζες των φυτών. Αν και αποτελεί συνήθως λιγότερο από το 5% της εδαφικής οργανικής ουσίας (Dalal, 1998), πραγματοποιεί πολλές κρίσιμες λειτουργίες στο εδαφικό οικοσύστημα, μεταξύ των οποίων θα μπορούσε να επισημανθεί ότι είναι ταυτόχρονα και πηγή και δεξαμενή των θρεπτικών ουσιών, συμμετέχει στους μετασχηματισμούς των C, N, P και S, διαδραματίζει ενεργό ρόλο στην αποικοδόμηση των ξενοβιοτικών οργανικών ενώσεων και στην αδρανοποίηση των βαρέων μετάλλων, συμμετέχει στο σχηματισμό της δομής του εδάφους κ.α. (Gil et al., 2004).

Ο οργανικός άνθρακας της μικροβιακής βιομάζας έχει προταθεί ως πιο ευαίσθητος δείκτης των αλλαγών που συμβαίνουν σε ένα έδαφος σε σχέση με τον συνολικό οργανικό C (Anderson and Domsch, 1990), καθώς η μικροβιακή βιομάζα ενός εδάφους ανταποκρίνεται γρηγορότερα στις αλλαγές από ότι η οργανική ουσία (Powlson and Jenkinson, 1981). Αυτό σημαίνει ότι εάν ένα έδαφος βρίσκεται σε διαδικασία υποβάθμισης, αυτή η υποβάθμιση θα μπορούσε να ανιχνευθεί πρώτιστα από τις μικροβιακές αλλαγές, ενώ δεν θα ανιχνεύονταν αλλαγές στην οργανική ουσία σε έναν πρόωρο στάδιο υποβάθμισης. Ο Sparling (1997) πρότεινε ότι η αναλογία οργανικός C βιομάζας/συνολικός οργανικός C θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για τη σύγκριση εδαφών με διαφορετικά μέρη οργανικής ουσίας. Οι Jenkinson και Ladd (1981) επίσης πρότειναν για τα καλλιεργημένα εδάφη, ότι μια τιμή 2.2 αυτής της αναλογίας απεικονίζει μια καλή ισορροπία μεταξύ των δύο μερών C (C μικροβιακής βιομάζας και συνολικός οργανικός C). Εντούτοις, αλλαγές σε αυτήν την αναλογία λόγω των διαφορετικών διαχειριστικών ή καλλιεργητικών πρακτικών θα μπορούσε να επισκιάσουν από κλιματικούς παράγοντες που έχουν επιπτώσεις σε αυτήν την αναλογία (Insam et al., 1989). Διαφορές σε αυτό το «ζωντανό» μέρος του οργανικού άνθρακα μπορεί να απεικονίζουν αλλαγές στο έδαφος εξαιτίας διαχειριστικών πρακτικών, οργώματος, τροποποιήσεων, ρύπανσης ή ακόμη και αλλαγής κλίματος, τα οποία σχετίζονται μάλλον περισσότερο με την έννοια της περιβαλλοντικής ποιότητας ενός εδάφους. Συνεπώς, λαμβάνοντας υπόψη τους βασικούς ρόλους της μικροβιακής βιομάζας για την κατάλληλη λειτουργία του εδάφους, δεν προκαλεί εντύπωση η διαδεδομένη χρήση της ως ποιοτικού δείκτη του εδάφους. Εντούτοις, πρέπει να σημειωθεί ότι είναι δυνατό να υπάρχουν διαφορές

στη μικροβιακή βιομάζα μεταξύ διαφορετικών τύπων εδάφους χωρίς να υπάρχουν διαφορές στην ποιότητα (Schloter et al., 2003), και για το λόγο αυτό είναι απαραίτητο η αξιολόγηση των εδαφών να γίνεται με την εξέταση ποικίλων δεικτών. (Bastida et al., 2008).

2.10.4 Δραστηριότητα αφυδρογονάσης

Η μεγάλη ποσότητα βιομηχανικών χημικών ουσιών, λιπασμάτων και φυτοφαρμάκων που εφαρμόζονται στο έδαφος σηματοδοτεί έναν αυξανόμενο περιβαλλοντικό κίνδυνο. Ειδικά στο έδαφος, αυτές οι τοξικές ενώσεις μπορεί να προκαλέσουν αρνητικά και ίσως ανεπανόρθωτα αποτελέσματα στην ποιότητα και την υγεία του, καθώς έχουν επιπτώσεις στο μικρο-βίόκοσμο με εμφανείς αλλαγές στην ενζυμική δραστηριότητα, την εδαφική αναπνοή, τη βιομάζα και τους μικροβιακούς πληθυσμούς. Οι δραστηριότητες των εδαφικών ενζύμων, έχουν προταθεί ως κατάλληλοι δείκτες της ποιότητας αγροτικών και μη αγροτικών εδαφών καθώς (Rao et al., 2006):

- είναι ένα μέτρο της εδαφικής μικροβιακής δραστηριότητας και επομένως συσχετίζονται σε μεγάλο βαθμό με τους θρεπτικούς κύκλους και το μετασχηματισμό των διαφόρων στοιχείων
- είναι ευαίσθητες στις μεταβολές που προκαλούνται και από φυσικούς και από ανθρωπογενείς παράγοντες
- η διαδικασία υπολογισμού τους είναι σχετικά απλή και
- μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως βιοδείκτες διαδικασιών υποβάθμισης και βιοεξυγίανσης.

Ένα από τα γενικά κριτήρια που χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό της μικροβιακής δραστηριότητας και τη βιομάζας στο έδαφος είναι η δραστηριότητα των αφυδρογονασών (Ross 1971; Trevors et al. 1982). Η αφυδρογονάση είναι ένα ένζυμο που χρησιμεύει ως ένας γενικός δείκτης μικροβιακής δραστηριότητας και που συσχετίζεται με την οξειδωση οργανικών ενώσεων και τη μεταφορά των ηλεκτρονίων προς παραγωγή ενέργειας για το μικροβιακό κύτταρο. Οι ενδοκυτταρικές αφυδρογονάσες ανήκουν στις οξειδοοδουκτάσες (ή οξειδαναγνάσες) και καταλύουν την οξείδωση των οργανικών ενώσεων με το διαχωρισμό δύο ατόμων υδρογόνου. Κάποιες συγκεκριμένες αφυδρογονάσες μεταφέρουν το διαχωρισμένο H είτε σε δινουκλεοτίδια νικοτιναμίδης αδενίνης (NAD) είτε σε φωσφορικά δινουκλεοτίδια νικοτιναμίδης αδενίνης (NADP). Μέσω αυτών των συνενζύμων τα άτομα υδρογόνου συμμετέχουν στις περιοριστικές διαδικασίες της βιοσύνθεσης. Για το λόγο αυτό, η δραστηριότητα του συνόλου των αφυδρογονασών ενός εδάφους εξαρτάται από τις αντίστοιχες των επιμέρους αφυδρογονασών, οι οποίες αποτελούν θεμελιώδες μέρος του ενζυμικού συστήματος όλων των μικροοργανισμών (ένζυμα του αναπνευστικού μεταβολισμού, του κύκλου του κιτρικού άλατος και του μεταβολισμού του N). Οι αφυδρογονάσες είναι ένζυμα που βρίσκονται σε όλους τους ζωντανούς οργανισμούς. Τα ένζυμα αυτά λαμβάνουν μέρος σε πολλές μεταβολικές διεργασίες συμπεριλαμβανομένης και της μεταφοράς ζευγών ηλεκτρονίων. Σε καταβολικές αντιδράσεις, όπως για παράδειγμα αντιδράσεις που περιλαμβάνουν τη μετατροπή σύνθετων ή υψηλής ενέργειας ενώσεων σε απλούστερες ή χαμηλότερης ενέργειας ενώσεις, οι αφυδρογονάσες καταλύουν τη μεταφορά των ζευγών ηλεκτρονίων από κάποια υποστρώματα στα NAD⁺ προς το σχηματισμό NADH. Τα NADH στη συνέχεια μεταφέρουν τα ηλεκτρόνια σε άλλες ενώσεις, χρησιμεύοντας με αυτόν τον τρόπο ως μεσάζοντες μεταφοράς ηλεκτρονίων. Σε αναβολικές αντιδράσεις, λαμβάνουν

μέρος τα NADP⁺ αντίστοιχα. Δύο υδρογόνα προστίθενται για τη διατήρηση της ενέργειας που καταναλώνεται. Πρόκειται για τα ηλεκτρόνια που μεταφέρονται. Καθώς οι αφυδρογονάσεις λαμβάνουν μέρος και στη μεταφορά ηλεκτρονίων των αερόβιων οργανισμών, η δραστηριότητά τους αποτελεί μέτρο της αναπνοής και της γενικής μικροβιακής δραστηριότητας. (Pepper & Gerba, 2004).

Κατά συνέπεια, η δραστηριότητα αφυδρογονασών χρησιμεύει ως ένας δείκτης του μικροβιολογικού οξειδοαναγωγικού συστήματος και μπορεί να θεωρηθεί καλό μέτρο των μικροβιακών οξειδωτικών δραστηριοτήτων του εδάφους (Skujins 1973; Casida 1977; Tabatabai 1982). Οι μικροοργανισμοί του εδάφους και ιδιαίτερα ο μικρο-βιόκοσμος (microbiota), διαδραματίζουν ουσιαστικό ρόλο στην ανακύκλωση των στοιχείων και στη σταθεροποίηση της εδαφικής δομής. Ενεργούν επίσης και ως πηγή και δεξαμενή για τις ασταθείς θρεπτικές ουσίες και τον άνθρακα. Η διάσπαση του οργανικού περιεχομένου του εδάφους πραγματοποιείται από μια μεγάλη κοινότητα μικροοργανισμών και περιλαμβάνει ένα ευρύ φάσμα μεταβολικών διεργασιών. Τα ένζυμα του εδάφους θεωρείται ότι είναι σε θέση να διακρίνουν τις πρακτικές διαχείρισης του εδάφους πιθανόν επειδή σχετίζονται με τη μικροβιακή βιομάζα, η οποία είναι ευαίσθητη σε τέτοιες επεξεργασίες. Τα ένζυμα του εδάφους ρυθμίζουν τις διεργασίες μετασχηματισμού των στοιχείων που απαιτούνται για την αύξηση των φυτών του εδάφους. Η δραστηριότητα των εδαφικών ενζύμων, είτε εξωκυτταρικών είτε ενδοκυτταρικών εξαρτάται από την αμειψισπορά, τις διάφορες τροποποιήσεις, το όργωμα και τη γεωργική διαχείριση. Ο μετασχηματισμός του N στο έδαφος περιλαμβάνει μια σειρά διεργασιών, οι οποίες ρυθμίζονται από διάφορα εξωκυτταρικά ένζυμα. Ο μετασχηματισμός του οργανικού P μέσω ενζυμικών αντιδράσεων και η σταθεροποίηση του P στην ίδια τη βιομάζα παίζουν θεμελιώδη ρόλο στον κύκλο του P και είναι πιθανό να επηρεαστεί από τις τροποποιήσεις P. (Sah et al., 2008)

3 Διερεύνηση Δεικτών Αποτίμησης Βιοποικιλότητας

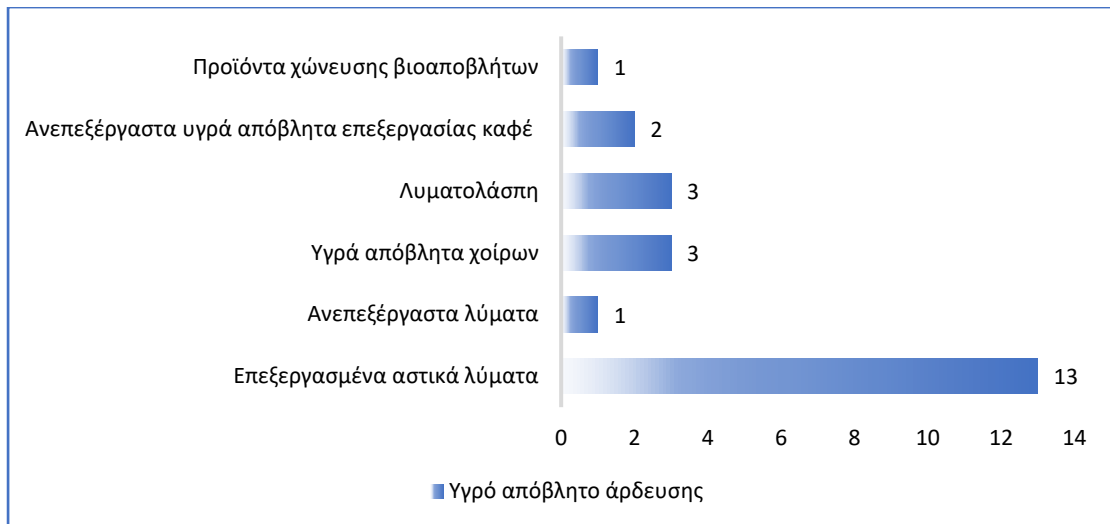
Διεξήχθη ενδεδειγμένη έρευνα σε αξιόπιστες επιστημονικές βάσεις δεδομένων ακαδημαϊκής βιβλιογραφίας, όπως οι Scopus, Web of Science και Google scholar για την απάντηση στο βασικό ερευνητικό ερώτημα «Ποιοι δείκτες χρησιμοποιούνται για την αποτίμηση της βιοποικιλότητας σε εδάφη τα οποία αρδεύονται με λύματα». Οι λέξεις-κλειδιά που χρησιμοποιήθηκαν ήταν ("Biodiversity" ή "Diversity index" ή "Soil index" ή "reuse" ή "Soil biodiversity" ή "Soil health" ή "Soil quality" ή "Soil microbial community" ή "Mesofauna" ή "Macrofauna" ή "Microfauna" ή "microorganisms abundance") και ("irrigation" ή "fertigation") και ("untreated wastewater" ή "swine wastewater" ή "Treated wastewater" ή "biosludge" ή "sewage sludge" ή "biogeochemical cycles" ή "activity of enzymes" ή "EHA" ή "biochemical balance"). Τα αποτελέσματα της ανασκόπησης χρησιμοποιήθηκαν για τη δημιουργία μιας βάσης δεδομένων με σχήματα και πίνακες που απεικονίζουν ποιοι δείκτες χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση της υγείας του εδάφους στα άρθρα των τελευταίων δέκα ετών (2011 – Αύγουστος 2021), σε ποια συχνότητα, ποιο είδος οργανισμών επηρεάστηκε περισσότερο (από τη βιοποικιλότητα, την αφθονία μέχρι και τις ενζυμικές δραστηριότητες) και τέλος, τι είδους λύματα χρησιμοποιήθηκαν για την άρδευση του εδάφους. Αυτό μας βοηθάει να κατανοήσουμε τα νεότερα στοιχεία και να εξάγουμε συμπεράσματα σχετικά με τη χρήση αυτών των δεικτών και την υγεία του εδάφους.

Μια μεθοδική βιβλιογραφική αναζήτηση μέχρι τον Δεκέμβριο του 2021 εντόπισε πάνω από 35 αναφορές. Μετά την αφαίρεση των άρθρων που δεν αντιπροσώπευαν πλήρως το θέμα και μετά από έναν ενδεδειγμένο έλεγχο των περιλήψεων, οι μελέτες που ανταποκρίνονταν στο θέμα της διερεύνησης είναι 24.

Σε αυτές τις εργασίες, η βασική διερεύνηση είναι η επίδραση που έχει η άρδευση στο έδαφος με την εφαρμογή λυμάτων. Η άρδευση με υγρά απόβλητα μπορεί να έχει επιπτώσεις σε δύο διαφορετικά επίπεδα: να μεταβάλλει τις φυσικοχημικές και μικροβιολογικές ιδιότητες του εδάφους ή/και να εισάγει και να συμβάλει στη συσσώρευση χημικών και βιολογικών ρύπων στο έδαφος.

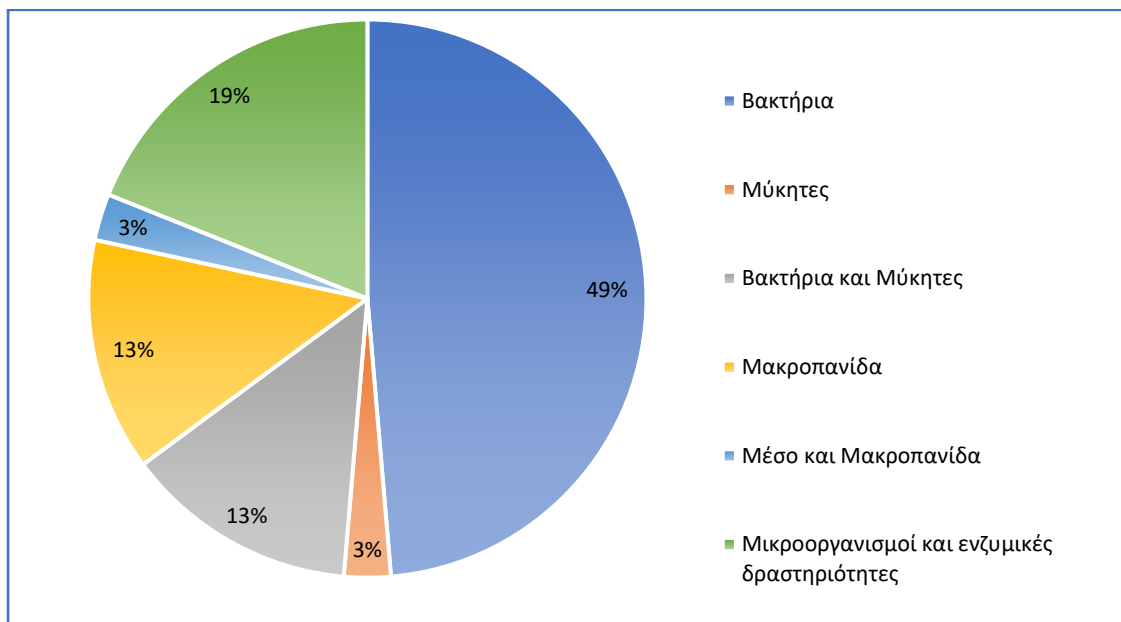
Παρατηρείται, ότι οι δείκτες που χρησιμοποιούνται περισσότερο για την εκτίμηση της υγείας του εδάφους είναι οι μικροοργανισμοί, αφού εξετάζονται σε 18 από τα 23 άρθρα. Πιο συγκεκριμένα, βακτήρια εξετάζονται σε 13 άρθρα, μύκητες σε 1, ενώ 5 άρθρα αφορούν και τα δύο (βακτήρια και μύκητες).

Συνολικά, από τις 23 μελέτες, οι 6 αναφέρονται σε μακροπανίδα (macrofauna) ως δείκτες ποιότητας εδάφους και 1 σε μέσο-μακροπανίδα (meso-macrofauna), ενώ παράλληλα σε πολλές εργασίες εξετάζεται και η πορεία των βιογεωχημικών κύκλων και οι ενζυμικές δραστηριότητες.



Διάγραμμα 1: Κατηγοριοποίηση με βάση το υγρό απόβλητο άρδευσης που χρησιμοποιήθηκε σε κάθε μελέτη

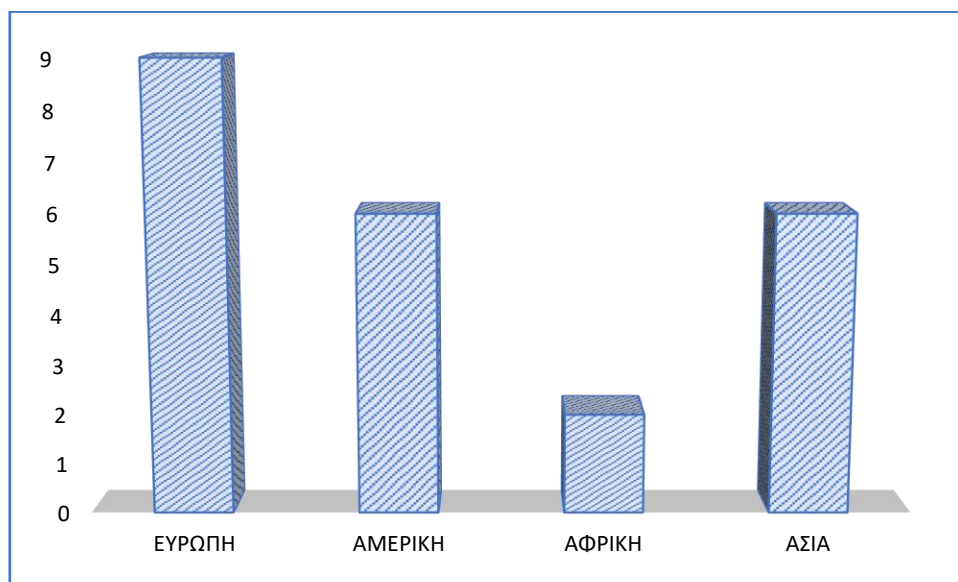
Στην εν λόγω μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία, δεν μελετήθηκαν μόνο επεξεργασμένα αστικά λύματα από αστικές περιοχές. Άρδευση πραγματοποιείται με διάφορα είδη υγρών αποβλήτων όπως πχ. από χοίρους, τα οποία επηρεάζουν την ποιότητα και υγεία του εδάφους σημαντικά. Σε όλες τις εργασίες, έγινε σύγκριση της άρδευσης με υγρά απόβλητα με άρδευση με φρέσκο νερό το οποίο μπορεί να προέρχεται από υπόγεια ύδατα, ποτάμια, λίμνες κ.ά. Είναι σημαντικό να τονισθεί, πως οι εργασίες που μελετήθηκαν δεν αναφέρουν τον τρόπο και βαθμό επεξεργασίας των αστικών λυμάτων.



Διάγραμμα 2: Κατηγοριοποίηση συνολικών εργασιών με βάση το δείκτη ποιότητας εδάφους που χρησιμοποιήθηκε σε κάθε μελέτη

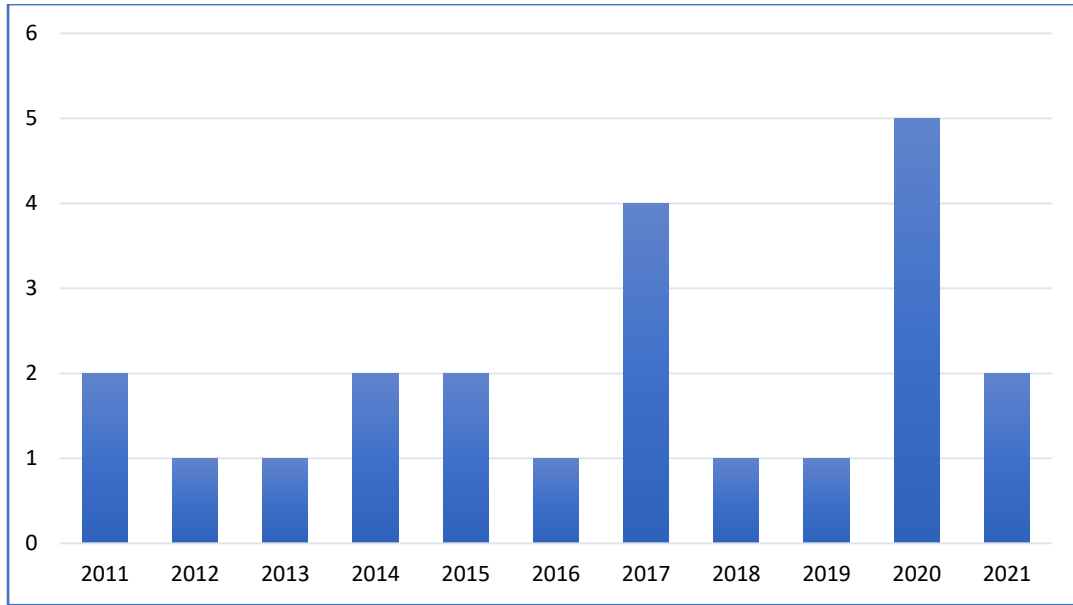
Οι περισσότερες εργασίες (53%) μελετούν μικροοργανισμούς, και πιο συγκεκριμένα το 49% αφορά βακτήρια ενώ μόλις 3% αφορά μύκητες. Το 13% από το σύνολο των εργασιών μελετά

ταυτόχρονα βακτήρια και μύκητες, ενώ μικροοργανισμούς σε συνδυασμό με ενζυμικές δραστηριότητες μελετά το 19% των εργασιών. Τέλος, το 13% χρησιμοποίησε ως δείκτη ποιότητας εδάφους μακροπανίδα ενώ μόλις το 3% μέσο και μέσο-μακροπανίδα.



Διάγραμμα 3: Μελέτες ανά ήπειρο

Οι περισσότερες μελέτες πραγματοποιήθηκαν στην Ευρώπη κυρίως Ισπανία και Πορτογαλία. Παρατηρείται όμως, ότι έρευνες γίνονται σε όλο τον κόσμο, λιγότερο όμως στην Αφρική αφού για την υλοποίησή τους χρειάζονται απαιτούνται πόροι, οι οποίοι δεν υπάρχουν. Αναλυτικά στο παράρτημα, παρουσιάζονται οι εργασίες μαζί με τις χώρες από τις οποίες προέρχονται.



Διάγραμμα 4: Κατηγοριοποίηση με βάση τον αριθμό των μελετών που πραγματοποιήθηκαν κάθε έτος

Παρατηρείται πως μελέτες πραγματοποιούνται κυρίως τα τελευταία 10 χρόνια.

3.1 Επίδραση λυμάτων σε μικροοργανισμούς

Τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί οι μοριακές τεχνικές, οι οποίες χρησιμοποιούνται και στις περισσότερες μελέτες της μικροβιακής κοινότητας του εδάφους. Οι μοριακές τεχνικές μας δίνουν τη δυνατότητα να μελετήσουμε σε βάθος τις αλλαγές που καταγράφονται σε ό,τι αφορά τη βιοποικιλότητα και για το αν υπάρχουν αλλαγές στην κυριαρχία ή στη δομή κάποιων οργανισμών (βακτήρια: στόχευση γονιδίου 16s rRNA, μύκητες: ITS).

Ωστόσο, πολλοί επιστήμονες χρησιμοποιούν βιοχημικές μεθόδους προκειμένου να κάνουν εκτίμηση της αφθονίας των βακτηρίων και των μυκήτων που υπάρχουν στο έδαφος, και αν αυτοί αυξάνονται ή μειώνονται. Η μέθοδος φωσφολιπιδίων της κυτταρικής μεμβράνης (PLFA) αφορά την εκτίμηση της αφθονίας (βιομάζα) και της δομής σε επίπεδο μικροβιακών ομάδων (Gram+, Gram- βακτήρια, μύκητες, ακτινομύκητες, μικροευκαρυώτες)

Η μοριακή τεχνική αφορά την ποικιλότητα μικροοργανισμών και είναι η τεχνική που χρησιμοποιείται περισσότερο για την εύρεση δεικτών ποιότητας εδάφους.

Πίνακας 21: Σύνολο εργασιών στις οποίες έγιναν μελέτες για την επίδραση των λυμάτων στην αφθονία και βιοποικιλότητα των μικροοργανισμών του εδάφους

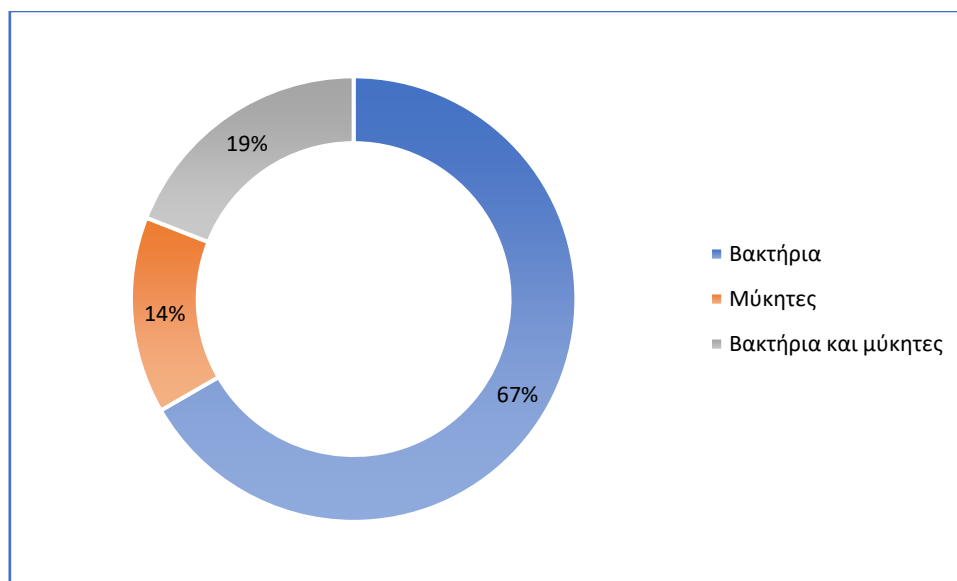
Συγγραφέας	Μικροοργανισμοί Δείκτες	Παράμετρος	Είδος	Υγρά Απόβλητα	Τεχνική	Σημείο αναφοράς
Bastida et al., 2018	Συνολική μικροβιακή βιομάζα	Αφθονία μικροοργανισμών	Βακτήρια Μύκητες	Επεξεργασμένα αστικά λύματα	Βιοχημική τεχνική	Φρέσκο γλυκό νερό ποταμού
Hakkoum et al., 2021	Cyanobacteria	Μικροβιακή ποικιλότητα	Βακτήρια	Επεξεργασμένα αστικά λύματα	Μοριακή τεχνική	Φρέσκο γλυκό νερό υπόγειων υδάτων
Ibekwe et al., 2017	Proteobacteria Firmicutes Actinobacteria	Μικροβιακή ποικιλότητα	Βακτήρια	Επεξεργασμένα αστικά λύματα	Μοριακή τεχνική	Φρέσκο γλυκό νερό
Becerra-Castro et al., 2014	Proteobacteria Actinobacteria Firmicutes Bacteroidetes Acidobacteria Gracilicutes	Μικροβιακή ποικιλότητα	Βακτήρια	Επεξεργασμένα αστικά λύματα	Μοριακή τεχνική	Φρέσκο γλυκό νερό
Kayikcioglu, 2011	Συνολική βακτηριακή βιομάζα	Αφθονία μικροοργανισμών	Βακτήρια	Επεξεργασμένα αστικά λύματα	Βιοχημική τεχνική	Φρέσκο γλυκό νερό
Guedes et al., 2021	Firmicutes Saprophytic fungi	Μικροβιακή ποικιλότητα	Βακτήρια Μύκητες	Επεξεργασμένα αστικά λύματα	Μοριακή τεχνική	Φρέσκο γλυκό νερό

Mkhinini et al., 2020	Actinobacteria	Μικροβιακή ποικιλότητα	Βακτήρια	Επεξεργασμένα αστικά λύματα	Μοριακή τεχνική	Φρέσκο γλυκό νερό
Frenk et al., 2014	Actinobacteria Proteobacteria	Μικροβιακή ποικιλότητα	Βακτήρια Μύκητες	Επεξεργασμένα αστικά λύματα	Μοριακή τεχνική	Φρέσκο γλυκό νερό
Wafula et al., 2015	Proteobacteria Actinobacteria	Μικροβιακή ποικιλότητα	Βακτήρια	Επεξεργασμένα αστικά λύματα	Μοριακή τεχνική	Φρέσκο γλυκό νερό
Xu et al., 2020	Proteobacteria Firmicutes Actinobacteria	Μικροβιακή ποικιλότητα και αφθονία	Βακτήρια	Ανεπεξέργαστα λύματα	Μοριακή τεχνική	Φρέσκο γλυκό νερό υπογείων υδάτων
Vergine et al., 2015	Proteobacteria	Μικροβιακή ποικιλότητα	Βακτήρια	Επεξεργασμένα αστικά λύματα	Μοριακή τεχνική	Φρέσκο γλυκό νερό
Kulandaivelu et al., 2011	Proteobacteria Actinomycetes	Μικροβιακή ποικιλότητα και αφθονία	Βακτήρια Μύκητες	Ανεπεξέργαστα υγρά απόβλητα επεξεργασίας καφέ	Μοριακή τεχνική	Φρέσκο γλυκό νερό
De Moura et al., 2016	Proteobacteria Firmicutes	Μικροβιακή ποικιλότητα	Βακτήρια	Υγρά απόβλητα χοίρων	Μοριακή τεχνική	Φρέσκο γλυκό νερό
Ondreicková et al., 2019	Glomeromycetes Mucoromycota	Μικροβιακή ποικιλότητα	Μύκητες	Λυματολάσπη	Μοριακή τεχνική	Φρέσκο γλυκό νερό
Markowicz et al., 2020	Proteobacteria Firmicutes Actinobacteria	Μικροβιακή ποικιλότητα	Βακτήρια	Λυματολάσπη	Μοριακή τεχνική	Φρέσκο γλυκό νερό
Adrover et al., 2012	Συνολική βακτηριακή βιομάζα	Αφθονία μικροοργανισμών	Βακτήρια	Δευτεροβάθμια Επεξεργασμένα αστικά λύματα	Βιοχημική τεχνική	Φρέσκο γλυκό νερό
Bastida et al., 2017	Proteobacteria Acidobacteria Bacteroidetes Firmicutes Actinobacteria	Μικροβιακή ποικιλότητα και αφθονία	Βακτήρια Μύκητες	Επεξεργασμένα αστικά λύματα	Μοριακή τεχνική	Φρέσκο γλυκό νερό ποταμού
Garcia-Orénes et al., 2014	Actinobacteria	Μικροβιακή αφθονία	Βακτήρια	Επεξεργασμένα αστικά λύματα	Βιοχημική τεχνική	Φρέσκο γλυκό νερό

Συνολικά, 15 εργασίες χρησιμοποίησαν μοριακή τεχνική. Η βιοχημική μέθοδος αφορά κυρίως τη βιομάζα και χρησιμοποιήθηκε σε 4 μελέτες. Παρατηρούμε πως οι μελέτες που

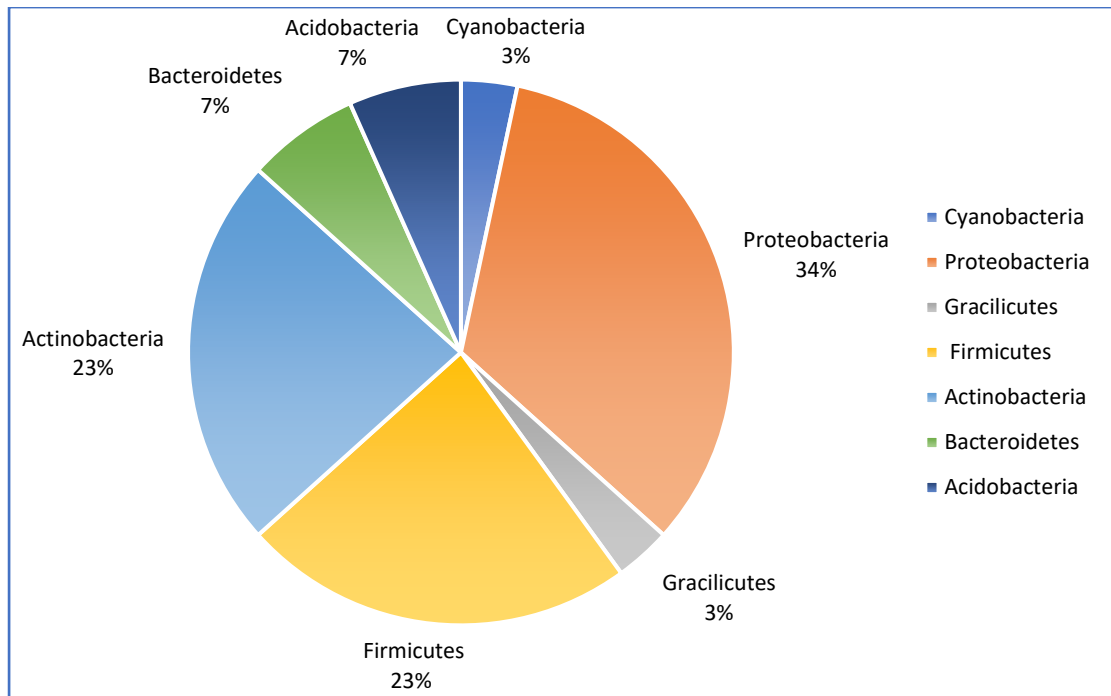
αφορούν άρδευση με επεξεργασμένα αστικά λύματα μελετούν κατά κύριο λόγο βακτήρια, και σε κάποιες περιπτώσεις βακτήρια και μύκητες μαζί. Επιπλέον, οι έρευνες που χρησιμοποίησαν λυματολάσπη, ανεπεξέργαστα υγρά απόβλητα επεξεργασίας καφέ και υγρά απόβλητα χοίρων χρησιμοποίησαν και τα δύο ως δείκτες ποιότητας εδάφους. Από τα παραπάνω στοιχεία παρατηρούμε επιπλέον, ότι στις περισσότερες εργασίες που μελετήθηκαν ως δείκτες οι μικροοργανισμοί, εφαρμόστηκαν κυρίως επεξεργασμένα αστικά λύματα για άρδευση και επιπλέον οι μελέτες που αφορούν βακτήρια είναι περισσότερες από αυτές που χρησιμοποιούν μύκητες.

Πιο αναλυτικά παρουσιάζεται στα παρακάτω διαγράμματα.



Διάγραμμα 5: Ποσοστό μικροοργανισμών που χρησιμοποιήθηκαν στις μελέτες

Τα βακτήρια έχουν πρωταρχικό ρόλο στις μελέτες που πραγματοποιούνται για την ποιότητα του εδάφους, αφού αυτά χρησιμοποιούνται ως δείκτες, όταν αυτό ποτίζεται με επεξεργασμένα ή ανεπεξέργαστα λύματα. Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνονται αναλυτικά όλες οι κατηγορίες βακτηρίων που μελετήθηκαν τα τελευταία 10 χρόνια σε όλο τον κόσμο.



Διάγραμμα 6: Ποσοστό βακτηρίων που καταγράφηκαν στις μελέτες

Παρατηρείται πως από τα λύματα, οι οργανισμοί που φαίνεται να επηρεάζονται κατά κύριο λόγο, είτε θετικά, είτε αρνητικά, είναι τα Proteobacteria, τα Actinobacteria και οι Firmicutes. Περίπου το 57% των μελετών που εξετάστηκαν αφορούν μετρήσεις Proteobacteria και Actinobacteria, 23% Firmicutes, 14% αφορούν Acidobacteria και Bacteroidetes, ενώ μόλις το 6% αφορά Cyanobacteria και Gracilicutes. Τα Proteobacteria, όπως και οι Firmicutes είναι από τις μεγαλύτερες ομάδες μικροοργανισμών και για αυτό το λόγο είναι πιθανό να καταγράφονται σε όλες σχεδόν τις μελέτες. Με βάση τα παραπάνω, είναι ενδεικτικό ότι μία από αυτές τις τρεις ομάδες θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ως δείκτης γιατί είναι αυτή που κατά κύριο λόγο μεταβάλλεται.

3.1.1 Μελέτες με χρήση βιοχημικής μεθόδου και μικροοργανισμούς ως δείκτες

Στις μελέτες στις οποίες η εκτίμηση της μικροβιακής βιομάζας πραγματοποιείται με βιοχημική μέθοδο, έχουμε τη δυνατότητα να υπολογίσουμε μόνο τη μικροβιακή βιομάζα και όχι τη μικροβιακή ποικιλότητα. Για αυτό το λόγο ακριβώς, αυτές οι μελέτες δεν είναι σύγχρονες και πραγματοποιήθηκαν σε παλαιότερα έτη και κυρίως μας δίνουν τη δυνατότητα να δούμε πως η προσθήκη λυμάτων επηρεάζει τη βιοκοινότητα μέσω αύξησης κάποιων παραμέτρων, όπως είναι κατά κύριο λόγο η οργανική ουσία.

Πίνακας 22: Εκτίμηση της επίδρασης επεξεργασμένων λυμάτων στην αφθονία μικροοργανισμών με χρήση βιοχημικής μεθόδου

Άρθρο	Αφθονία	Υγρά Απόβλητα
(Bastida et al., 2018)	+	Επεξεργασμένα αστικά λύματα
(Garcia-Orénes et al., 2014)	+	Επεξεργασμένα αστικά λύματα
(Kayikcioglu, 2011)	+	Επεξεργασμένα αστικά λύματα
(Adrover et al., 2012)	+	Επεξεργασμένα αστικά λύματα

Και στις τέσσερις μελέτες υπήρξε αύξηση της αφθονίας της μικροβιακής βιομάζας, συνεπώς η άρδευση με επεξεργασμένα αστικά λύματα, λειτούργησε ευεργετικά για τα εξεταζόμενα εδάφη.

Στην εργασία των **Kayikcioglu et al. 2011**, παρατηρήθηκε γενικά αύξηση της μικροβιακής βιομάζας του εδάφους, χωρίς να προσδιορίζεται το είδος μικροοργανισμών. Ο λόγος του οργανικού άνθρακα των μικροοργανισμών προς τον ολικό οργανικό άνθρακα του εδάφους (Cmic/Corg) βρέθηκε υψηλότερος στα εδάφη που αρδεύτηκαν με ανακτημένο νερό στο τέλος του πειράματος. Η προσθήκη οργανικής ύλης στο έδαφος με άρδευση με ανακτημένο νερό από λύματα, είναι η αιτία για την αύξηση αυτού του λόγου, δηλαδή της μικροβιακής βιομάζας (**Kayikcioglu, 2011**). Στην τελευταία μελέτη **Adrover et al. (2012)**, όπως και στην προηγούμενη, μελετήθηκε μόνο η αύξηση της μικροβιακής βιομάζας. Στη συγκεκριμένη μελέτη παρατηρήθηκαν μη αρνητικές επιδράσεις της άρδευσης με επεξεργασμένα λύματα στις μετρούμενες εδαφικές παραμέτρους. Ο διαλυτός οργανικός άνθρακας και η μικροβιακή βιομάζα του εδάφους αυξήθηκε κατά την άρδευση με επεξεργασμένα λύματα (**Adrover et al., 2012**). Και στις δύο εργασίες που προαναφέρθηκαν, η μικροβιακή βιομάζα φαίνεται να αυξάνεται κατά πολύ, και αυτό οι ερευνητές το αποδίδουν στην αύξηση της οργανικής ουσίας που περιέχεται στα λύματα, η οποία αποτελεί τροφή για τους μικροοργανισμούς. Στις εργασίες των **Bastida et al. (2018)** και **Garcia-Orénes et al. (2014)** παρατηρείται πως υπάρχει αύξηση της αφθονίας των βακτηρίων και πιο συγκεκριμένα των Gram⁺. Η αύξηση των Gram⁺ βακτηρίων αποτελεί ένδειξη σταθερότητας της βιοκοινότητας καθώς αυτά δεν είναι ομορτομιστικά είδη, όπως είναι τα Gram⁻ βακτήρια και δείχνουν ότι η προσθήκη των λυμάτων δημιουργεί τις προϋποθέσεις για βελτίωση των συνθηκών του εδάφους. Η άρδευση με επεξεργασμένα λύματα δεν επηρέασε αρνητικά τη μικροβιακή κοινότητα του

εδάφους. Πράγματι, η άρδευση με επεξεργασμένα λύματα επηρέασε θετικά τη μικροβιακή βιομάζα, βακτήρια και μύκητες, και τις βιογεωχημικές δραστηριότητες των μικροβιακών κοινοτήτων του εδάφους (**Bastida et al., 2018**). Στη συγκεκριμένη εργασία (**Garcia-Orénes et al., 2014**), χρησιμοποιήθηκε μία προχωρημένη βιοχημική μέθοδος, με τη μέτρηση φωσφολιπιδίων (PLFAs), η οποία μας δίνει τη δυνατότητα να εκτιμήσουμε τη βιομάζα αλλά και ποιες ομάδες μικροοργανισμών επηρεάζονται (Gram⁺ και Gram⁻ βακτήρια, ακτινομύκητες, μύκητες, πρωτόζωα).

3.1.2 Μελέτες με χρήση μοριακής μεθόδου και ως δείκτες μικροοργανισμούς

Στις μελέτες που χρησιμοποίησαν τη μοριακή μέθοδο και μικροοργανισμούς ως δείκτες, παρατηρείται πως στις περισσότερες περιπτώσεις η άρδευση με υγρά απόβλητα, λειτούργησε σχετικά ευεργετικά για το έδαφος. Στις 10 από τις 19 μελέτες αυξήθηκε η αφθονία των μικροοργανισμών-δεικτών ενώ από το σύνολο των μελετών, στις 9 αυξήθηκε η βιοποικιλότητα. Στις υπόλοιπες μελέτες, δε μειώθηκε απαραίτητα η αφθονία και η βιοποικιλότητα. Σε επτά εργασίες δεν υπήρξε διαφοροποίηση, ενώ σε άλλες δεν μελετήθηκαν και οι δύο αυτές παράμετροι. Τέλος, παρατηρείται πως ευεργετική για το έδαφος ήταν η άρδευση με επεξεργασμένα ή ανεπεξέργαστα αστικά λύματα. Η λυματολάσπη και τα υγρά απόβλητα χοίρων είτε είχαν αρνητικό αποτέλεσμα ή δεν δημιούργησαν διαφοροποίηση.

Πίνακας 23: Αποτελέσματα μελετών με χρήση μοριακής μεθόδου

Άρθρο	Αφθονία	Βιοποικιλότητα	Μικροοργανισμοί Δείκτες	Υγρά Απόβλητα
(Hakkoum et al., 2021)		+	Cyanobacteria	Επεξεργασμένα αστικά λύματα
(Ibekwe et al., 2018)	+	Δεν υπάρχει διαφοροποίηση	Proteobacteria Firmicutes Actinobacteria	Επεξεργασμένα λύματα
(Becerra-Castro et al., 2014)	+	+	Proteobacteria Actinobacteria Firmicutes Bacteroidetes Acidobacteria	Επεξεργασμένα αστικά λύματα
(Guedes et al., 2021)	+	+	Firmicutes	Επεξεργασμένα αστικά λύματα
(Guedes et al., 2021)	-	+	Saprophytic fungi	Επεξεργασμένα αστικά λύματα
(Mkhinini et al., 2020)	+	+	Actinobacteria	Επεξεργασμένα αστικά λύματα
(Frenk et al., 2014)	+	Δεν υπάρχει διαφοροποίηση	Actinobacteria	Επεξεργασμένα αστικά λύματα
(Frenk et al., 2014)	+	Δεν υπάρχει διαφοροποίηση	Proteobacteria	Επεξεργασμένα αστικά λύματα

(Wafula et al., 2015)	+	+	Proteobacteria	Επεξεργασμένα αστικά λύματα
(Wafula et al., 2015)	-	+	Actinobacteria	Επεξεργασμένα αστικά λύματα
(Xu et al., 2020)	+	+	Proteobacteria Firmicutes	Ανεπεξέργαστα λύματα
(Xu et al., 2020)	-	+	Actinobacteria	Ανεπεξέργαστα λύματα
(Vergine et al., 2015)	Μη διαφοροποίηση		<i>E.coli</i>	Επεξεργασμένα αστικά λύματα
(Kulandaivelu et al., 2011)	+	Δεν υπάρχει διαφοροποίηση	Proteobacteria Actinomycetes	Ανεπεξέργαστα υγρά απόβλητα επεξεργασίας καφέ
(De Moura et al., 2016)	+	-	Proteobacteria Firmicutes	Υγρά απόβλητα χοίρων
(Ondreichová et al., 2019)		Δεν υπάρχει διαφοροποίηση	Glomeromycetes Mucoromycota	Λυματολάσπη
(Markowicz et al., 2020)	-	Δεν υπάρχει διαφοροποίηση	Proteobacteria Firmicutes Actinobacteria	Λυματολάσπη
(Bastida et al., 2017)	+	Δεν υπάρχει διαφοροποίηση	Proteobacteria Acidobacteria Bacteroidetes Firmicutes Actinobacteria	Επεξεργασμένα αστικά λύματα

Αναλύοντας περαιτέρω τις μελέτες που χρησιμοποιήθηκαν για την εξαγωγή των παραπάνω αποτελεσμάτων, παρατηρείται πως στη μελέτη των **Hakkoum et al., 2021**, η εισαγωγή οργανικής ύλης και θρεπτικών συστατικών από τα επεξεργασμένα λύματα φαίνεται να είναι ευεργετική για την αύξηση της βιοποικιλότητας των κυανοβακτηρίων του εδάφους. Η έρευνα αυτή παρέχει μια πρώτη καταγραφή των κυανοβακτηριακών κοινοτήτων του εδάφους και δείχνει τη χωρική τους μεταβλητότητα και την υψηλή ευαισθησία τους στις πρακτικές χρήσης γης και τις ανθρωπογενείς διαταραχές στο αστικό έδαφος ενώ ταυτόχρονα δεν παρατηρείται διαφοροποίηση στην αφθονία των κυανοβακτηρίων του εδάφους.

Η επίδραση της προσφοράς οργανικής ύλης στο εδαφικό μικροβίωμα εξηγείται πιθανότατα από το γεγονός ότι η άρδευση λυμάτων μερικές φορές συνδέεται με αύξηση της μικροβιακής βιομάζας του εδάφους και των δραστηριοτήτων των ενζύμων του εδάφους. Η αύξηση της μικροβιακής βιομάζας και της βιοποικιλότητας, στα πρωτεοβακτήρια και ακτινοβακτήρια του εδάφους, λόγω της άρδευσης με υγρά απόβλητα παρατηρήθηκε και στη συγκεκριμένη μελέτη. Η επίδραση αυτή μπορεί να οφείλεται στην παροχή οργανικού άνθρακα, όπως υποδηλώνει η ταυτόχρονη αύξηση της δραστηριότητας της αφυδρογονάσης (**Becerra-Castro et al., 2014**).

Στη μελέτη των **Guedes et al., 2021** παρατηρήθηκε πως η άρδευση με ανακτημένο νερό από υγρά απόβλητα δεν άλλαξε σημαντικά τις φυσικοχημικές ιδιότητες. Η κυριαρχία των

Firmicutes ενισχύθηκε με την πάροδο του χρόνου σε όλα τα εδαφικά συστήματα (φθάνοντας πάνω από το 70% της συνολικής αφθονίας), αλλά το ανακτημένο νερό βοήθησε επιπλέον, να διατηρηθεί η υψηλή βακτηριακή ποικιλότητα. Τέλος, περιορίστηκε η αύξηση της σχετικής αφθονίας των σαπροφυτικών μυκήτων (Saprophytic fungi).

Προχωρώντας στην εργασία των **Mkhinini et al., 2020**, τα αποτελέσματά έδειξαν σημαντική αύξηση στη μικροβιακή βιομάζα του εδάφους που μελετήθηκε, δηλαδή στα ακτινοβακτήρια. Ο δείκτης ποικιλότητας Shannon που χρησιμοποιείται συνήθως για να χαρακτηρίσει την ποικιλότητα των ειδών έδειξε σημαντική μεταβολή και αύξηση στη βιοποικιλότητα του εδάφους. Επιπλέον, η μακροχρόνια άρδευση με επεξεργασμένα λύματα αύξησε τις μεταβολικές δραστηριότητες των μικροοργανισμών του εδάφους.

Η εργασία των **Wafula et al., 2015** είχε παρόμοια αποτελέσματα με τις προηγούμενες. Πιο συγκεκριμένα, έδειξε ότι η άρδευση με επεξεργασμένα λύματα είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση της σχετικής αφθονίας των πρωτεοβακτηρίων και τη μείωση της σχετικής αφθονίας των ακτινοβακτηρίων, ενώ παράλληλα αυξήθηκε η μικροβιακή ποικιλότητα του εδάφους.

Τέλος, σε μία ακόμα μελέτη (**Xu et al., 2020**) η βιοποικιλότητα του εδάφους αυξήθηκε σημαντικά ενώ παράλληλα η σχετική αφθονία των πρωτεοβακτηρίων και των Firmicutes αυξήθηκε όταν το έδαφος αρδεύτηκε με ανεπεξέργαστα λύματα, ενώ τα ακτινοβακτήρια μειώθηκαν.

Στην εργασία των **Ibekwe et al., 2018** τα αποτελέσματα αναλύθηκαν για να συγκρίνουμε την ποικιλότητα και την αφθονία διαφορετικών βακτηριακών ομάδων σε εδάφη που αρδεύονται με εξεργασμένα λύματα, και σε εδάφη που έχουν αρδευτεί με φρέσκο νερό. Η μικροβιακή ποικιλία δεν ήταν σημαντικά διαφορετική μεταξύ εδαφών που αρδεύτηκαν με νερό από επεξεργασμένα λύματα και φρέσκο νερό. Οι τιμές του δείκτη ποικιλότητας Shannon δείχνουν ότι η μικροβιακή ποικιλότητα δεν διέφερε σημαντικά μεταξύ των εδαφών. Οι περισσότερες αλληλουχίες που σχετίζονται με νιτροποιητικά βακτήρια, αζωτοδεσμευτικά βακτήρια, βακτήρια που αποικοδομούν τον άνθρακα, απονιτροποιητικά βακτήρια, δυνητικά παθογόνα και βακτήρια-δείκτες κοπράνων ήταν πιο άφθονες στα επεξεργασμένα λύματα σε σχέση με το φρέσκο νερό. Η εργασία αυτή έδειξε ότι η προσθήκη λυμάτων δεν επηρεάζει την ποικιλότητα αλλά μόνο την αφθονία των υπαρχόντων μικροοργανισμών, λόγω της προσθήκης μεγάλης ποσότητας οργανικού υλικού και κυρίως αζώτου. Επομένως, τα υγρά απόβλητα μπορεί να περιέχουν βακτήρια που μπορεί να είναι πολύ ενεργά σε πολλές λειτουργίες του εδάφους, καθώς και ορισμένα πιθανά παθογόνα. Στην παρούσα μελέτη εντοπίστηκαν περίπου 25 αλληλουχίες που περιέχουν δυνητικά ανθρώπινα παθογόνα, όπως *Mycobacterium*, *Nocardia* και *Clostridium*. Γενικά, ανιχνεύστηκε υψηλότερη ποσοστιαία συγκέντρωση δυνητικά επιβλαβών βακτηρίων στα επεξεργασμένα λύματα από ό,τι στο φρέσκο νερό, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε κινδύνους για την υγεία των ανθρώπων που έρχονται σε επαφή με το μολυσμένο έδαφος. Προφανώς, αυτό εξαρτάται από το είδος και το βαθμό της επεξεργασίας των λυμάτων και την απόδοση του συστήματος απολύμανσης. Η εφαρμογή επεξεργασμένων λυμάτων έχει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα και πρέπει να δίνεται προσοχή στην εφαρμογή του σε έδαφος για καλλιέργεια λαχανικών ή δενδρωδών καλλιεργειών λόγω της παρουσίας δυνητικών μολυσματικών μικροοργανισμών. Επομένως, απαιτούνται περισσότερες έρευνες σχετικά με

τις επιπτώσεις της άρδευσης με επεξεργασμένα λύματα στην πιθανή μετάδοση παθογόνων και άλλων μολυσματικών παραγόντων.

Παρόμοια αποτελέσματα έδειξε και η μελέτη των **Frenk et al., 2014** όπου, κατά τη διάρκεια της περιόδου άρδευσης, παρατηρήθηκε μείωση της σχετικής αφθονίας των ακτινοβακτηρίων και αύξηση της σχετικής αφθονίας των πρωτεοβακτηρίων στα εδάφη που αρδεύονταν με επεξεργασμένα λύματα, ενώ παράλληλα δεν διαφοροποιήθηκε η μικροβιακή ποικιλότητα. Η αφθονία των πρωτεοβακτηρίων στο έδαφος έχει αναφερθεί ότι αυξάνεται ως αποτέλεσμα της λίπανσης (Jangidet al., 2008), των οργανικών ενώσεων χαμηλού μοριακού βάρους (Eilerset al., 2010- Jenkinset al.,2010) και των οργανικών τροποποιήσεων διαφόρων τύπων (Clevelandet al., 2007- Fiereret al., 2007- Langenhederand Prosser, 2008- Philippotet al., 2009). Επιπλέον, η αφθονία των Ακτινοβακτηρίων συσχετίστηκε αρνητικά με τα επίπεδα νιτρικών και αμμωνίου στο έδαφος (Philippotet al., 2009).

Συνεχίζοντας, μελέτες με παρεμφερή αποτελέσματα ως προς τη βιοποικιλότητα έχουν και οι εργασίες των **Markowicz et al., 2020** και των **Bastida et al., 2017**.

Η μελέτη των **Markowicz et al., 2020** υποστήριξε ότι, σε αντίθεση με τις προσδοκίες, η λίπανση του εδάφους με ιλύ (λυματολάσπη) δεν αυξάνει την περιεκτικότητα σε οργανική ουσία. Επιπλέον, η αύξηση των μικροβιακών παραμέτρων ήταν μόνο προσωρινή και γενικά, παρατηρήθηκε μείωση του αριθμού των βακτηρίων στο έδαφος ως απόκριση στην εφαρμογή λυματολάσπης. Παράλληλα, δεν παρατηρήθηκε διαφοροποίηση στη βιοποικιλότητα του εδάφους. Τα αποτελέσματά δείχνουν ότι δεν επιτεύχθηκε η αναμενόμενη ευεργετική επίδραση της λίπανσης του εδάφους με την εφαρμογή της συγκεκριμένης ιλύος. Όσον αφορά την εργασία των **Bastida et al., 2017** η βακτηριακή βιομάζα ήταν πιο ευαίσθητη στην άρδευση όταν χρησιμοποιήθηκαν επεξεργασμένα λύματα, ενώ η μυκητιακή βιομάζα ήταν πιο ευαίσθητη στην άρδευση όταν χρησιμοποιήθηκε φρέσκο νερό. Η αύξηση της αφθονίας των πρωτεοβακτηρίων και των βακτηριοειδών στα εδάφη που αρδεύτηκαν με επεξεργασμένα λύματα, υποδηλώνει μεγαλύτερη ανθεκτικότητα στη ρυθμιζόμενη ελλειμματική άρδευση. Τέλος, και σε αυτή τη μελέτη όπως και στις προηγούμενες δεν υπήρξε διαφορά στη βιοποικιλότητα βακτηρίων και μυκήτων.

Όσον αφορά την επόμενη μελέτη (**Kulandaivelu et al., 2011**) η εφαρμογή ποσότητας ανεπεξέργαστων υγρών αποβλήτων επεξεργασίας καφέ αυξάνει σημαντικά τον πληθυσμό των καλλιεργήσιμων βακτηρίων, των μυκήτων, των ζυμομυκήτων και των ακτινομυκήτων του εδάφους ενώ παράλληλα δεν παρατηρείται και εδώ διαφορά στη βιοποικιλότητα του εδάφους.

Η τελευταία μελέτη (**Ondreicková et al., 2019**) με παρόμοια αποτελέσματα όσον αφορά τη βιοποικιλότητα, χρησιμοποίησε ως εναλλακτικό τρόπο άρδευσης λυματολάσπη. Με βάση τη συγκεκριμένη μελέτη, δεν παρατηρήθηκαν σημαντικές αλλαγές στη συνολική ποικιλότητα των μυκήτων. Τα αποτελέσματά έδειξαν ότι η βραχυπρόθεσμη εφαρμογή λυματολάσπης στο έδαφος δεν προκαλεί μεταβολή στη σύνθεση της μυκητιακής κοινότητας.

Η μελέτη των **Vergine et al., 2015** είχε ως δείκτη το βακτήριο *E.coli*. Η μελέτη αυτή στοχεύει στο βακτήριο *E.coli*, το οποίο αποτελεί δείκτη για παθογόνους οργανισμούς και έχει ως σκοπό τον έλεγχο ύπαρξης δυνητικής παθογένειας. Η αφθονία του βακτηρίου *E.coli* δεν

επηρεάστηκε σημαντικά από την άρδευση με επεξεργασμένα αστικά λύματα στις περιοχές μελέτης, συνεπώς δεν δημιουργήθηκαν συνθήκες μόλυνσης στο έδαφος και η άρδευση μπορεί να συνεχιστεί κανονικά. Η μελέτη αυτή έδειξε τι συμβαίνει στο έδαφος και βραχυπρόθεσμα αλλά και μακροπρόθεσμα.

Η μελέτη των **De Moura et al., 2016** που χρησιμοποίησε υγρά απόβλητα από χοίρους, είχε ως αποτέλεσμα να αυξηθεί η ποσότητα των μικροοργανισμών στο έδαφος. Η μακροχρόνια χρήση επηρέασε σημαντικά την ποσότητα και την ποιότητα των μικροοργανισμών του εδάφους. Η παρατεταμένη χρήση, ιδιαίτερα σε υψηλότερες δόσεις, προκάλεσε μικρότερη ποικιλότητα των ομάδων μικροοργανισμών στο έδαφος και εδραίωσε τη μονιμότητα ορισμένων ομάδων της βακτηριακής κοινότητας, όπως είναι τα πρωτεοβακτήρια και firmicutes.

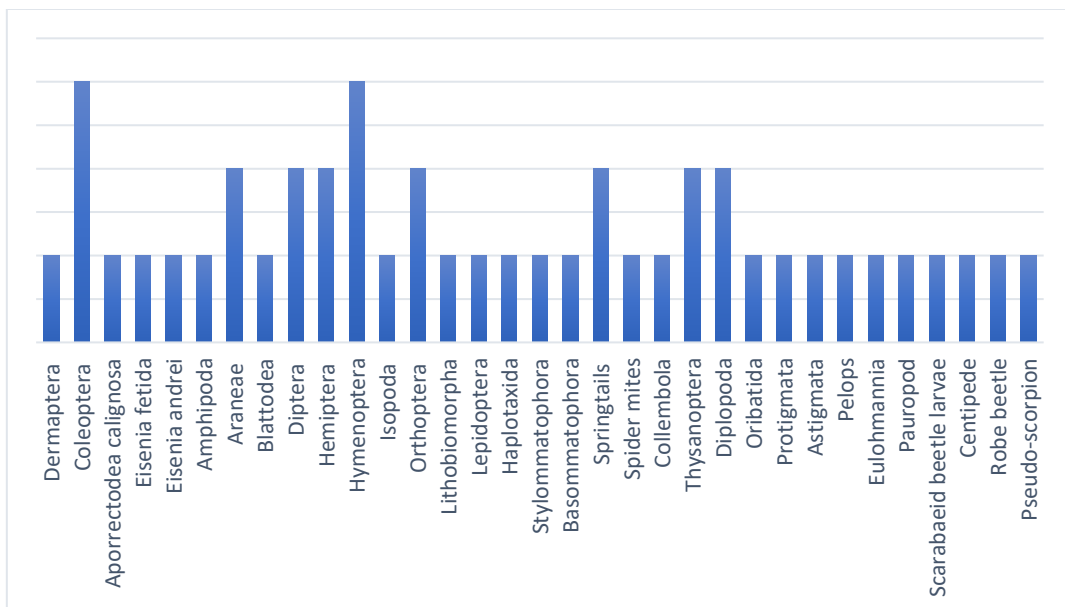
3.2 Επίδραση λυμάτων σε μεσοπανίδα και μακροπανίδα

Όσον αφορά τις μελέτες που πραγματοποιήθηκαν για μεσοπανίδα και μακροπανίδα, βλέπουμε πως δεν βρέθηκαν πολλές, παρά μόνο 6. Οι οργανισμοί αυτοί συλλέγονται κυρίως με παγίδες από το χώρο μελέτης, γίνεται αναγνώριση και καταγραφή. Παρατηρούμε πως καταγράφηκαν κυρίως διάφορα είδη μακροπανίδας και λίγα μεσοπανίδας. Οι περισσότερες εργασίες που σχετίζονται με μάκρο και μέσο πανίδα δεν εμβαθύνουν τόσο πολύ σε επίπεδο είδους αλλά παραμένουν σε ανώτερο επίπεδο κατάταξης, διότι αυτό προϋποθέτει γνώσεις σε βάθος πάνω στην κατάταξη των οργανισμών αυτών.

Πίνακας 24: Σύνολο εργασιών στις οποίες έγιναν μελέτες για την επίδραση των λυμάτων στην αφθονία και βιοποικιλότητα των μέσο και μάκρο οργανισμών του εδάφους

Συγγραφέας	Οργανισμός	Είδος	Υγρά Απόβλητα	Σημείο Αναφοράς
Mkhinini et al., 2018	Opisthopora (Eisenia andrei)	Μακροπανίδα	Επεξεργασμένα αστικά λύματα	Φρέσκο γλυκό νερό
Kanwal et al., 2020	Arthropoda (Amphipoda Araneae Blattodea Coleoptera Dermaptera Diptera Hemiptera Hymenoptera Isopoda Orthoptera Lithobiomorpha Lepidoptera) Annelida (Haplotaxida) Mollusca (Stylommatophora Basommatophora)	Μακροπανίδα	Ανεπεξεργαστα λύματα	Φρέσκο γλυκό νερό
Ross et al., 2017	Opisthopora (Eisenia fetida) Haplotaxida (Aporrectodea caliginosa)	Μακροπανίδα	Προϊόντα χώνευσης βιοαποβλήτων	Φρέσκο γλυκό νερό
Tessaro et al., 2013	Hymenopetra Coleoptera	Μακροπανίδα	Υγρά απόβλητα χοίρων από αναερόβια χώνευση	Φρέσκο γλυκό νερό

<p>Maciel et al., 2017</p>	<p>Springtails Spider mites Collembola Hymenoptera Hemiptera Coleoptera Diptera Orthoptera Araneae Thysanoptera Diplopoda Oribatida Mesostigmataa Protigmata Astigmata</p>	<p>Μακροπανίδα Μεσοπανίδα</p>	<p>Υγρά απόβλητα χοίρων</p>	<p>Φρέσκο γλυκό νερό</p>
<p>Kulandaivelu et al., 2011</p>	<p>Thrips Pelops Eulohmannia Millipede (Diplopede) Pauropod Scarabaeid beetle Larvae Centipede Springtail Robe beetle Pseudo-scorpion</p>	<p>Μακροπανίδα</p>	<p>Ανεπεξέργαστα υγρά απόβλητα επεξεργασίας καφέ</p>	<p>Φρέσκο γλυκό νερό</p>



Διάγραμμα 7: Οργανισμοί μέσο-μάκρο πανίδας που χρησιμοποιήθηκαν ως δείκτες ποιότητας εδάφους

Η μακροπανίδα του εδάφους είναι ένας από τους βιοδείκτες για τον προσδιορισμό της ποιότητας του εδάφους. Πολλά είδη οργανισμών χρησιμοποιήθηκαν σε μόλις 6 μελέτες και κατά κύριο λόγο τα Coleoptera και τα Hymenoptera. Αυτές οι δύο είναι από τις μεγαλύτερες ομάδες μακροπανίδας του εδάφους και εμφανίζουν πολλά διαφορετικά είδη.

3.2.1 Μελέτες που χρησιμοποίησαν ως δείκτες μέσο και μάκρο πανίδα

Προχωρώντας στις μελέτες που έγιναν σε μάκρο και μέσο πανίδα, παρατηρούμε πως όλοι οι τρόποι άρδευσης είχαν ως αποτέλεσμα την αύξηση του πληθυσμού της μέσο και μάκρο πανίδας, εκτός από τα εδάφη που αρδεύτηκαν με ανεπεξέργαστα λύματα και ανεπεξέργαστα υγρά απόβλητα επεξεργασίας καφέ. Παρατηρείται επίσης, πως η ποικιλότητα δεν μελετήθηκε στα περισσότερα εδάφη παρά μόνο όταν το έδαφος αρδεύτηκε με υγρά απόβλητα χοίρων, όπου υπήρξε αύξησή της.

Πίνακας 25: Αποτελέσματα μελετών με χρήση δεικτών μέσο και μάκρο πανίδας για την αποτίμηση της επίδρασης των λυμάτων στο έδαφος

Άρθρο	Αφθονία	Βιοποικιλότητα	Οργανισμοί δείκτες	Υγρά Απόβλητα
(Mkhinini et al., 2018)	+		Opisthopora	Επεξεργασμένα αστικά λύματα
(Kanwal et al., 2020)	-		Arthropoda Annelida Mollusca	Ανεπεξέργαστα λύματα
(Ross et al., 2017)	+		Eisenia fetida Aporrectodea caliginosa	Προϊόντα χώνευσης βιοαποβλήτων
(Tessaro et al., 2013)	+	+	Hymenoptera Coleoptera	Υγρά απόβλητα χοίρων
(Maciel et al., 2017)	+		Springtails Spider mites Collembola Hymenoptera Hemiptera Coleoptera Diptera Orthoptera Araneae Thysanoptera Diplopoda Arachnida	Υγρά απόβλητα χοίρων
(Kulandaivelu et al., 2011)	-		Thrips Pelops Eulohmannia Millipede	

			(Diplopede) Pauropod Scarabaeid beetle Larvae Centipede Springtail Robe beetle Pseudo-scorpion	Ανεπεξέργαστα υγρά απόβλητα επεξεργασίας καφέ
--	--	--	--	---

Πιο αναλυτικά, σε 4 από τις 6 μελέτες, η αφθονία του πληθυσμού των οργανισμών μακροπανίδας αυξήθηκε και παρατηρείται επίσης ότι τα εδάφη αυτά αρδεύτηκαν με διαφορετικά υγρά απόβλητα. Στη μελέτη των **Mkhinini et al., 2018**, τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η αφθονία στους γαιοσκώληκες αυξήθηκε σημαντικά όταν εκτέθηκαν σε εδάφη που αρδεύτηκαν με επεξεργασμένα λύματα, ενώ παρατηρείται πως η βιοποικιλότητα δεν μελετήθηκε. Στην μελέτη των **Ross et al., 2017** όπου παρατηρήθηκε αύξηση της αφθονίας των *Eisenia fetida* κατά 25%, σημειώθηκε πως τα *Aporrectodea caliginosa* απέρριψαν τα χωνεμένα βιοαπόβλητα και δεν παρατηρήθηκαν διαφορές στην αφθονία. Με βάση τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης, η εφαρμογή προϊόντων βιοαποβλήτων σε καλλιεργήσιμες εκτάσεις έχει θετικά αποτελέσματα σε συγκεκριμένα είδη μακροπανίδας. Αύξηση της αφθονίας παρατηρήθηκε και στην μελέτη των **Maciel et al., 2017**, όπου οι υψηλότερες αφθονίες βρέθηκαν μεταξύ των ομάδων των κολλέμβολων και των αραχνοειδών ακάρεων. Επιπλέον διαπιστώθηκε πως οι δόσεις υγρών αποβλήτων από χοίρους και η ανόργανη λίπανση δεν έχουν επιπτώσεις στους οικολογικούς δείκτες (Shannon και Simpson) της μέσο και μακροπανίδας του εδάφους.

Συνεχίζοντας, μόνο μία εργασία (**Tessaro et al., 2013**) συμπέρανε πως εκτός από την αφθονία επηρεάζεται σημαντικά και η βιοποικιλότητα με την εφαρμογή υγρών αποβλήτων χοίρων στο έδαφος. Η ποικιλότητα των οργανισμών αξιολογήθηκε με τη χρήση των δεικτών πλούτου Shannon-Wiener, Pielou και αφθονία ειδών. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η χρήση υγρών αποβλήτων χοίρων αύξησε σημαντικά την πυκνότητα των υμενόπτερων. Η συνδυασμένη χρήση υγρών αποβλήτων χοίρων και του 100% της συνιστώμενης δόσης χημικής λίπανσης για την καλλιέργεια οδήγησε σε σημαντική αύξηση της πυκνότητας της τάξης των Coleoptera. Η άρδυσή του με υγρά απόβλητα χοίρων οδήγησαν σε μεγαλύτερη ποικιλότητα και πλούτο της εδαφικής πανίδας.

Τέλος, μόνο σε 2 από τις 6 μελέτες μειώθηκε η αφθονία της μέσο και μακρο πανίδας, ενώ η ποικιλότητα δεν μελετήθηκε. Στην μία από αυτές τις έρευνες (**Kanwal et al., 2020**), η αφθονία που μελετήθηκε έδειξε πως ο πληθυσμός των διαφόρων ειδών μειώθηκε στα εδάφη που αρδεύτηκαν με ανεπεξέργαστα λύματα. Η πιο συχνή τάξη που βρέθηκε ήταν τα κολεόπτερα. Τα βαρέα μέταλλα δεν αποικοδομούνται και συσσωρεύονται στην εδαφική πανίδα, τα οποία προκαλούν βλάβες ανάλογα με το επίπεδο έκθεσης (Nahmaniet al., 2002; D'Amoreet al., 2005). Όταν τα βαρέα μέταλλα είναι παρόντα στα υγρά απόβλητα προκαλούν επικίνδυνες επιδράσεις στην εδαφική χλωρίδα και πανίδα που κατοικούν, επιδρώντας αρνητικά στη λειτουργία των πληθυσμών της εδαφικής μακροπανίδας. Όσον αφορά την εργασία των **Kulandaivelu et al., 2011**, παρατηρήθηκε σημαντική μείωση των πληθυσμών των ειδών *pelops*, *eulohmannia* και *springtail* με την εφαρμογή ανεπεξέργαστων υγρών αποβλήτων επεξεργασίας καφέ. Συνολικά, τα αποτελέσματα ανέδειξαν σημαντικές αλλαγές στις

ιδιότητες του εδάφους κατά την εφαρμογή ανεπεξέργαστων υγρών αποβλήτων επεξεργασίας καφέ, όπου οι αλλαγές εξαρτώνται από τον όγκο των αποθηκευμένων λυμάτων.

3.3 Επίδραση λυμάτων στην ενζυμική δραστηριότητα

Οι εδαφικές δραστηριότητες των ενζύμων συνδέονται άμεσα με τη βιοποικιλότητα και αφθονία των μικροοργανισμών. Οι βιοχημικοί μετασχηματισμοί της οργανικής ύλης του εδάφους συμβαίνουν ως αποτέλεσμα της μικροβιολογικής δραστηριότητας υπό την επίδραση ενζύμων. Τα ένζυμα είναι υπεύθυνα για την ανακύκλωση των θρεπτικών συστατικών και παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο στους βιογεωχημικούς κύκλους (C,N και P). Θρεπτικά συστατικά από δύσκολα αφομοιώσιμες ενώσεις μεταφέρονται σε εύκολα διαθέσιμες μορφές για φυτά και μικροοργανισμούς. Τα ένζυμα διακρίνονται από υψηλή δραστηριότητα, αυστηρή ειδικότητα δράσης και μεγάλη εξάρτηση από διάφορες περιβαλλοντικές συνθήκες. Λόγω της καταλυτικής τους λειτουργίας, παρέχουν μια γρήγορη πορεία ενός τεράστιου αριθμού βιοχημικών αντιδράσεων.

Πίνακας 26: Σύνολο εργασιών στις οποίες έγιναν μελέτες για την επίδραση των λυμάτων στην ενζυμική δραστηριότητα του εδάφους

Συγγραφέας	Βιοχημικοί κύκλοι	Ένζυμα	Υγρά απόβλητα	Σημείο αναφοράς
Becerra-Castro et al., 2014	N	Ουρεάση	Επεξεργασμένα λύματα	Φρέσκο γλυκό νερό
	C	Κυτταράση		
	C	Αφυδρογονάση		
	C	Λακκάση		
	N	Πρωτεάση		
Bastida et al., 2018	C	Β-γλυκοσιδάση	Επεξεργασμένα λύματα	Φρέσκο γλυκό νερό
		Κελλοβιοϋδρολάση		
		Οξειδάση π-φαινόλης		
	N	Ουρεάση		
	N	N-ακετυλογλυκοζαμινιδάση		

Mkhinini et al., 2018	C	B-γλυκοσιδάση	Επεξεργασμένα λύματα	Φρέσκο γλυκό νερό
	S	Αρυλοσουλφατάση		
	P	Όξινη φωσφατάση		
	P	Αλκαλική φωσφατάση		
	N	Ουρεάση		
	C	Αφυδρογονάση		
	C	Δια-οξική φλουορεσκεΐνη		
Kayikcioglu, 2011	P	Αλκαλική φωσφατάση	Επεξεργασμένα αστικά λύματα	Φρέσκο γλυκό νερό
	C	B-γλυκοσιδάση		
	S	Αρυλοσουλφατάση		
	N	Ουρεάση		
	C	Αφυδρογονάση		
Antonious et al., 2020	N	Ουρεάση	Λυματολάσπη	Φρέσκο γλυκό νερό
	N	Αμιδοϋδρολάση ουρίας		
	N	Ινβερτάση		
	N	B-D - φρουκτοφουρανοσιδάση		
	P	Όξινη και αλκαλική φωσφατάση		
Markowicz et al., 2020	P	Αλκαλική και όξινη φωσφατάση	Λυματολάσπη	Φρέσκο γλυκό νερό
	N	Ουρεάση		
Bastida et al., 2017	C	B-γλυκοσιδάση	Επεξεργασμένα αστικά λύματα	Φρέσκο γλυκό νερό
	N	Ουρεάση		
	P	Φωσφατάση		
Adrover et al., 2012	C	B-γλυκοσιδάση	Επεξεργασμένα αστικά λύματα	Φρέσκο γλυκό νερό
	C	Αφυδρογονάση		
	P	Αλκαλική φωσφατάση		

Σύμφωνα με τον πίνακα 25, παρατηρούμε πως οι περισσότερες εργασίες εστιάζουν στους τρεις σημαντικότερους κύκλους (C,N και P) και μελετούν πληθώρα ενζύμων, 18 στο σύνολο. Το ένζυμο που μελετήθηκε σε όλες τις έρευνες είναι η ουρεάση από τον κύκλο του αζώτου , ενώ σε 4 μελέτες βλέπουμε και το ένζυμο αφυδρογονάση από τον κύκλο του άνθρακα και φωσφατάση από τον κύκλο του φωσφόρου. Το ένζυμο ουρεάση έχει πολύ σημαντικό ρόλο στην αποικοδόμηση της ουρίας. Το ένζυμο αφυδρογονάση αποτελεί ένδειξη της μικροβιακής δραστηριότητας και σχετίζεται στενά με τον κύκλο του άνθρακα και η φωσφατάση (αλκαλική και όξινη) σχετίζεται με την ανακύκλωση του φωσφόρου στο έδαφος.

3.3.1 Μελέτες που ασχολήθηκαν με ενζυμική δραστηριότητα

Παρατηρώντας τον Πίνακα 26, και έχοντας συγκεντρωτικά όλα τα αποτελέσματα για την επίδραση που είχε η άρδευση στα ένζυμα, έχουμε τα εξής συμπεράσματα, στις περισσότερες περιπτώσεις άρδευσης με επεξεργασμένα λύματα, τα αποτελέσματα ήταν ευεργετικά για το έδαφος και για τις ενζυμικές δραστηριότητες. Συγκεκριμένα, τα επεξεργασμένα λύματα επηρέασαν θετικά τα ένζυμα στις 5 από τις 6 περιπτώσεις που χρησιμοποιήθηκε. Όσον αφορά τη λυματολάσπη, η οποία χρησιμοποιήθηκε ως τρόπος άρδευσης σε 2 μελέτες, παρατηρήθηκε πως στη μία περίπτωση μείωσε σημαντικά τις ενζυμικές δραστηριότητες, ενώ στην άλλη μελέτη τα ίδια ένζυμα αυξήθηκαν. Συνεπώς, η λυματολάσπη θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί σε περισσότερα εδάφη για να προκύψει ένα πιο ασφαλές συμπέρασμα.

Πίνακας 27: Αποτελέσματα μελετών που αφορούν ενζυμική δραστηριότητα

Άρθρο	Βιοχημικοί κύκλοι	Ένζυμα	Επίδραση στο ένζυμο	Υγρά Απόβλητα
(Becerra-Castro et al., 2014)	N	Ουρεάση	+	Επεξεργασμένα αστικά λύματα
	C	Κυτταράση	+	
	C	Αφυδρογονάση	+	
	C	Λακκάση	+	
	N	Πρωτεάση	+	
(Bastida et al., 2018)	C	B-γλυκοσιδάση	+	
		Κελλοβιοϋδρολάση	-	
		Οξειδάση π-φαινόλης	-	

	N	Ουρεάση	+	Επεξεργασμένα αστικά λύματα
	N	N- ακετυλογλυκοζαμινιδάση	+	
(Mkhinini et al.,2018)	C	B-γλυκοσιδάση	+	Επεξεργασμένα αστικά λύματα
	S	Αρυλοσουλφατάση	+	
	P	Όξινη φωσφατάση	+	
	P	Αλκαλική φωσφατάση	+	
	N	Ουρεάση	+	
	C	Αφυδρογονάση	+	
	C	Δια-οξική φλουορεσκεΐνη	+	
(Kayikcioglu, 2011)	P	Αλκαλική φωσφατάση	-	Επεξεργασμένα αστικά λύματα
	C	B-γλυκοσιδάση	-	
	S	Αρυλοσουλφατάση	-	
	N	Ουρεάση	-	
	C	Αφυδρογονάση	-	
(Antonious et al., 2020)	N	Ουρεάση	+	Λυματολόαση
	N	Ινβερτάση	+	
	P	Όξινη και αλκαλική φωσφατάση	+	
(Markowicz et al., 2020)	P	Αλκαλική και όξινη φωσφατάση	-	Λυματολόαση
	N	Ουρεάση	-	
(Bastida et al., 2017)	C	B-γλυκοσιδάση	+	Επεξεργασμένα αστικά λύματα
	N	Ουρεάση	+	
	P	Φωσφατάση	+	
(Adrover et al., 2012)	C	B-γλυκοσιδάση	+	Επεξεργασμένα αστικά λύματα
	C	Αφυδρογονάση	+	
	P	Αλκαλική φωσφατάση	+	

Αναλυτικά παρακάτω, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για την κάθε μελέτη. Παρατηρείται πως στη μελέτη των **Becerra-Castro et al., 2014** αυξήθηκαν σημαντικά όλες οι τιμές των ενζύμων στο έδαφος που αρδεύτηκε με επεξεργασμένα λύματα, συνεπώς το έδαφος επηρεάστηκε θετικά. Τα ίδια ακριβώς αποτελέσματα δείχνουν και δύο ακόμα μελέτες που χρησιμοποίησαν επεξεργασμένα λύματα για άρδευση. Πιο αναλυτικά, η χρήση του ανακτημένου νερού προώθησε μια πιο ανθεκτική κοινότητα που κυριαρχείται από προσαρμοσμένα σε αλάτι μικροβιακά ταξινομημένα είδη, τα οποία δημιουργούν αύξηση της μικροβιακής βιομάζας και της ενζυμικής δραστηριότητας (**Bastida et al., 2017**), ενώ παράλληλα μία ακόμα μελέτη (**Adrover et al., 2012**) έδειξε πως οι δραστηριότητες της β-γλυκοσιδάσης, της αλκαλικής φωσφατάσης και της αφυδρογονάσης αυξήθηκαν κατά την άρδευση με επεξεργασμένα λύματα. Τέλος, αναλύσεις έδειξαν σημαντική αύξηση των ενζυμικών δραστηριοτήτων σε εδάφη που εκτέθηκαν σε επεξεργασμένα λύματα για 20 χρόνια (**Mkhinini et al., 2018**) όπως και στην περίπτωση των **Antonious et al., 2020** όπου οι αυξημένες δραστηριότητες ουρεάσης και ινβεράσης του εδάφους (47 και 89%, αντίστοιχα) καθώς και οι δραστηριότητες όξινης και αλκαλικής φωσφατάσης (23% και 26%, αντίστοιχα) σε έδαφος που αρδεύτηκε με λυματολάσπη παρείχαν στοιχεία αυξημένου μικροβιακού πληθυσμού του εδάφους και των ενζύμων που παράγουν.

Τα αποτελέσματα της μελέτης των **Bastida et al., 2018**, έδειξαν πως σχεδόν όλες οι ενζυμικές δραστηριότητες επηρεάστηκαν θετικά με την άρδευση με επεξεργασμένα λύματα, εκτός από τα ένζυμα κελλοβιοϋδρολάση και οξειδάση π-φαινόλης τα οποία ή μειώθηκαν ή δεν επηρεάστηκαν σημαντικά. Τέλος, παρατηρείται πως δεν αναφέρεται το ποσοστό μεταβολής των ενζύμων που μελετήθηκαν.

Στις τελευταίες δύο μελέτες του Πίνακα 26 παρατηρήθηκε αρνητική επίδραση στην αφθονία των πληθυσμών μέσο και μακρο πανίδας. Πιο συγκεκριμένα, όλες οι μικροβιακές παράμετροι επηρεάστηκαν αρνητικά από την άρδευση με επεξεργασμένα λύματα. Οι μικροβιακές παράμετροι μειώθηκαν κατά 10,1% έως 54,1% σε σύγκριση με τα δείγματα που ποτίστηκαν με φρέσκο νερό. Η αφθονία των μικροοργανισμών σχετίζεται άμεσα με την ενζυμική δραστηριότητα, συνεπώς η αρνητική επίδραση στους μικροοργανισμούς αντανάκλαται και στα ένζυμα. Η μείωση αυτή, ιδίως στις ενζυμικές δραστηριότητες του εδάφους που αρδεύτηκε με επεξεργασμένα λύματα, έγινε πιθανώς λόγω ορισμένων βαρέων μετάλλων (**Kayikcioglu, 2011**). Το ίδιο συμβαίνει και στην επόμενη μελέτη (**Markowicz et al., 2020**) όπου αντίθετα με τις προσδοκίες, παρατηρήθηκε γενική δυσμενής επίδραση στις εξεταζόμενες μικροβιακές παραμέτρους στο έδαφος που λιπάνθηκε. Το πείραμα στο πεδίο αποκάλυψε σημαντική μείωση των δραστηριοτήτων των αλκαλικών και όξινων φωσφατασών και της ουρεάσης όπου ως εναλλακτικός τρόπος άρδευσης χρησιμοποιήθηκε η λυματολάσπη.

4 Συμπεράσματα

Η επαναχρησιμοποίηση επεξεργασμένων ή ανεπεξέργαστων λυμάτων για άρδευση αποτελεί, όπως είδαμε, καθιερωμένη πρακτική σε πολλές περιοχές του κόσμου. Αποτελεί έναν εναλλακτικό υδατικό πόρο ο οποίος μπορεί να συνεισφέρει στην αντιμετώπιση φαινόμενων λειψυδρίας και να βοηθήσει στην εξοικονόμηση των πολύτιμων φυσικών υδάτινων πόρων.

Η βιβλιογραφική ανασκόπηση έδειξε ότι οι εργασίες οι οποίες εξετάζουν την αποτίμηση της υγείας του εδάφους (βιοποικιλότητα και αφθονία) με την εφαρμογή δεικτών όταν τα εδάφη αυτά αρδεύονται με υγρά λύματα είναι περιορισμένες (24). Οι εργασίες αυτές χρησιμοποιούν τη βιοποικιλότητα και την αφθονία των εδαφικών μικροοργανισμών και της μέσο και μακρο πανίδας ως δείκτες ποιότητας και υγείας του εδάφους. Πιο συγκεκριμένα, οι περισσότερες εργασίες εστιάζουν στους μικροοργανισμούς, κυρίως γιατί αυτή η ομάδα εδαφικών οργανισμών επηρεάζεται άμεσα από τις περιβαλλοντικές αλλαγές, όπως είναι η άρδευση με επεξεργασμένα ή ανεπεξέργαστα λύματα, με αποτέλεσμα αυτές οι μεταβολές να αποτυπώνονται γρήγορα στην βιοποικιλότητα και την αφθονία τους. Οι βασικοί μικροοργανισμοί που μελετώνται ως δείκτες είναι τα πρωτεοβακτήρια και τα ακτινοβακτήρια αφού αποτελούν τις μεγαλύτερες ομάδες βακτηρίων και για αυτό το λόγο καταγράφονται σε όλες σχεδόν τις μελέτες. Αλλαγές στη βιοποικιλότητα καταγράφονται με τη βοήθεια σύγχρονων μοριακών τεχνικών (βακτήρια: στόχευση γονιδίου 16s rRNA, μύκητες: ITS), οι οποίες προσδιορίζουν με ακρίβεια την όποια διαφοροποίηση στη σύνθεση της εδαφικής μικροβιακής κοινότητας. Η αφθονία των μικροοργανισμών μελετάται κυρίως με βιοχημικές μεθόδους (μέθοδος φωσφολιπιδίων της κυτταρικής μεμβράνης (PLFA)), παρέχοντας τη δυνατότητα εκτίμησης αλλαγών στα πληθυσμιακά μεγέθη των μικροβιακών ομάδων. Επιπρόσθετα, ο προσδιορισμός της δραστηριότητας των ενζύμων που σχετίζονται με τους σημαντικότερους γεωχημικούς κύκλους (άζωτο, άνθρακας και φώσφορος) αποτελεί έναν χρήσιμο δείκτη που συνδέεται άμεσα με τη λειτουργικότητα των μικροοργανισμών. Τα κύρια ένζυμα που μελετώνται είναι η ουρεάση, η αφυδρογονάση και η φωσφατάση.

Αναφορικά με την εδαφική πανίδα τα αποτελέσματα των εργασιών δείχνουν ότι η μικροπανίδα (πχ νηματώδεις) θα μπορούσε να αποτελέσει χρήσιμο δείκτη για την εκτίμηση της επίδρασης των λυμάτων στο εδαφικό σύστημα. Αντίθετα, η μέσο και μακρο πανίδα που βρίσκεται στην επιφάνεια του εδάφους, επηρεάζεται δύσκολα από αλλαγές στο περιβάλλον και μπορεί να χρειαστούν μέχρι και 5 χρόνια για να υπάρξει διαφορά στη βιοποικιλότητα και την αφθονία των οργανισμών αυτών. Οι ομάδες που κατά κύριο λόγο μελετήθηκαν είναι τα Coleoptera και τα Hymenoptera. Η μέσο και μακρο πανίδα, συνίσταται να χρησιμοποιείται ως δείκτης ποιότητας εδάφους σε μελέτες μεγαλύτερης κλίμακας που διαρκούν πολλά χρόνια και όχι μερικούς μήνες, όπως οι μελέτες που εξετάστηκαν στη συγκεκριμένη εργασία.

Παρατηρείται επίσης, πως δε μελετώνται τα δυνητικά μολυσματικά είδη, όπως είναι το *E.coli* και η Σαλμονέλα. Μία μόνο μελέτη εξέτασε το βακτήριο *E.coli* το οποίο αποτελεί δείκτη για βλαβερούς οργανισμούς και έχει ως σκοπό τον έλεγχο ύπαρξης παθογένειας. Τα αποτελέσματα έδειξαν πως η άρδευση με επεξεργασμένα λύματα δεν επηρέασε την αφθονία του βακτηρίου, συνεπώς δεν δημιουργήθηκαν συνθήκες μόλυνσης στο έδαφος.

Τέλος, παρατηρείται πως τα επεξεργασμένα αστικά λύματα είχαν θετική επίδραση στο έδαφος, αύξησαν στην αφθονία και τη βιοποικιλότητα των οργανισμών ενώ παράλληλα

λειτουργήσε ευεργετικά και για τις ενζυμικές δραστηριότητες των μικροοργανισμών, σε σχέση με τα υπόλοιπα είδη υγρών αποβλήτων/ιλύος που χρησιμοποιήθηκαν για άρδευση στις μελέτες που εξετάστηκαν (ανεπεξέργαστα λύματα, υγρά απόβλητα χοίρων, λυματολάσπη κ.ά.). Σε όλες τις εργασίες, έγινε σύγκριση της άρδευσης με υγρά απόβλητα με άρδευση με φρέσκο νερό το οποίο μπορεί να προέρχεται από υπόγεια ύδατα, ποτάμια, λίμνες κ.ά. Είναι σημαντικό να τονισθεί, πως οι εργασίες που μελετήθηκαν δεν αναφέρουν τον τρόπο και βαθμό επεξεργασίας των αστικών λυμάτων.

5 Βιβλιογραφία-Αναφορές

1. F.García-Orenes, F.Caravaca, A.Morugán-Coronado, A.Roldán (2014) 'Prolonged irrigation with municipal wastewater promotes a persistent and active soil microbial community in a semiarid agroecosystem', *Agricultural Water Management*, dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2014.10.030
2. P. Vergine, R. Saliba, C. Salerno, G. Laera, G. Berardi, A. Pollice (2015) 'Fate of the fecal indicator *Escherichia coli* in irrigation with partially treated wastewater', *Water Research* 66-73, dx.doi.org/10.1016/j.watres.2015.08.001
3. Alexandre C. De Moura, Silvio C. Sampaio, Marcelo B. Remor, Adriana P. Da Silva, Pamela M. Per Eira (2016) 'Long term effects of swine wastewater and mineral fertilizer association on soil microbiota', *Journal of the Brazilian Association of Agricultural Engineering*, dx.doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v36n2p 318-328/2016
4. Maria Adrover, Edelweiss Farrús, Gabriel Moyà, Jaume Vadell (2012) 'Chemical properties and biological activity in soils of Mallorca following twenty years of treated wastewater irrigation', *Journal of Environmental Management*, doi:10.1016/j.jenvman.2010.08.017
5. F. Bastida, I.F. Torres, C. Romero-Trigueros, P. Baldrian, T.Vetrovský, J.M. Bayona, J.J. Alarcon, T. Hernandez, C. García, E. Nicolas (2017) ' Combined effects of reduced irrigation and water quality on the soil microbial community of a citrus orchard under semi-arid conditions', *Soil Biology & Biochemistry*, dx.doi.org/10.1016/j.soilbio.2016.10.024
6. Z. Hakkoum, F. Minaoui, M. Douma, K. Mouhri and M. Loudiki (2021) 'Impact of human disturbances on soil cyanobacteria diversity and distribution in suburban arid area of Marrakesh, Morocco', *Ecological Processes*, doi.org/10.1186/s13717-021-00303-7
7. Katarína Ondreicková, Marcela Gubišová, Michaela Piliarová, Miroslav Horník, Pavel Matušinský, Jozef Gubiš, Lenka Klíčová, Martina Hudcovicová and Ján Kraic (2019) 'Responses of Rhizosphere Fungal Communities to the Sewage Sludge Application into the Soil', *Microorganisms*, doi:10.3390/microorganisms7110505
8. Cristina Becerra-Castro, Ana Rita Lopes, Ivone Vaz-Moreira, Elisabete F. Silva, Célia M. Manaia, Olga C. Nunes (2015) 'Wastewater reuse in irrigation: A microbiological perspective on implications in soil fertility and human and environmental health', *Environment International*, dx.doi.org/10.1016/j.envint.2014.11.001
9. George Fouad Antonious, Eric Todd Turley (2020) 'Trace Elements Composition and Enzymes Activity of Soil Amended with Municipal Sewage Sludge at Three Locations in Kentucky', *International Journal of Applied Agricultural Sciences*, doi: 10.11648/j.ijaas.20200605.11
10. Anna Markowicz, Kinga Bondarczuk, Mariusz Cycon, Sławomir Sułowicz (2021) 'Land application of sewage sludge: Response of soil microbial communities and potential spread of antibiotic resistance', *Environmental Pollution*, doi.org/10.1016/j.envpol.2020.116317
11. Sobia Kanwal and Naureen Rana (2020) 'Use of sewage wastewater in agriculture and its effects on soil macrofauna', DOI: 10.21162/PAKJAS/20.9485
12. Christina-Luise Ross, Verena Wilken, Stefanie Krück, Kerstin Nielsen, Karen Sensel-Gunke & Frank Ellmer (2017) 'Assessing the impact of soil amendments made of

processed biowaste digestate on soil macrofauna using two different earthworm species', *Archives of Agronomy and Soil Science*, 63:14, 1939-1950, DOI: 10.1080/03650340.2017.1316380

13. Ana P. C. Maciel, Silvio C. Sampaio, Marcelo B. Remor, Danielle M. Rosa, Ralpho R. Dos Reis (2017) 'Soil meso- and macrofauna in two soybean crops after swine wastewater application', *Journal of the Brazilian Association of Agricultural Engineering*, dx.doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v37n3p556-564/2017
14. A.M. Ibekwe, A. Gonzalez-Rubio, D.L. Suarez (2018) 'Impact of treated wastewater for irrigation on soil microbial communities', *Science of the Total Environment*, doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.10.039
15. D. Tessaro, S. C. Sampaio, L. F. A. Alves, J. Dieter, C. M. D. S. Cordovil, A. Varennes, and W. A. Pansera (2013) 'Macrofauna of soil treated with swine wastewater combined with chemical fertilization', *African Journal of Agricultural Research*, DOI: 10.5897/AJAR12.1829
16. Velmourougane Kulandaivelu, Rajeev Bhat (2012) 'Changes in the physico-chemical and biological quality attributes of soil following amendment with untreated coffee processing wastewater', *European Journal of Soil Biology*, doi:10.1016/j.ejsobi.2011.11.011
17. Xiaotao Xu, Sen Liu, Xiwang Zhu, Xiaoming Guo (2020) 'Comparative Study on Soil Microbial Diversity and Structure Under Wastewater and Groundwater Irrigation Conditions', *Current Microbiology*, doi.org/10.1007/s00284-020-02219-5
18. Denis Wafula, John R. White, Andy Canion, Charles Jagoe, Ashish Pathak, Ashvini Chauhan (2015) 'Impacts of Long-Term Irrigation of Domestic Treated Wastewater on Soil Biogeochemistry and Bacterial Community Structure', *American Society for Microbiology*, doi:10.1128/AEM.02188-15
19. Sammy Frenk, Yitzhak Hadar and Dror Minz (2014) 'Resilience of soil bacterial community to irrigation with water of different qualities under Mediterranean climate', *Environmental Microbiology*, doi:10.1111/1462-2920.12183
20. Marouane Mkhinini, Itab Boughattas, Vanessa Alphonse, Alexandre Livet, Nouredine Bousserhine, Mohammed Bann (2019) 'Effect of treated wastewater irrigation in East Central region of Tunisia(Monastir governorate) on the biochemical and transcriptomic response of earthworms *Eisenia andrei*', *Science of the Total Environment*, doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.449
21. Ajay Singh (2021) 'A review of wastewater irrigation: Environmental implications', *Resources, Conservation & Recycling*, doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105454
22. D. Fatta-Kassinos, I.K. Kalavrouziotis, P.H. Koukoulakis, M.I. Vasquez (2011) 'The risks associated with wastewater reuse and xenobiotics in the agroecological environment', *Science of the Total Environment*, doi:10.1016/j.scitotenv.2010.03.036
23. Solomon Ofori, Adéla Puškáčová, Iveta Růžičková, JiříWanner (2021) 'Treated wastewater reuse for irrigation: Pros and cons', *Science of the Total Environment*, doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144026
24. Marouane Mkhinini, Itab Boughattas, Vanessa Alphonse, Alexandre Livet, Stéphanie Giusti-Miller, Mohamed Banni, Nouredine Bousserhine (2020) 'Heavy metal accumulation and changes in soil enzymes activities and bacterial functional diversity under long-term treated wastewater irrigation in East Central region of Tunisia (Monastir governorate)', *Agricultural Water Management*, doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106150

25. Paula Guedes, Celso Martins, Nazaré Couto, Joana Silva, Eduardo P. Mateus, Alexandra B. Ribeiro, Cristina Silva Pereira (2021) 'Irrigation of soil with reclaimed wastewater acts as a buffer of microbial taxonomic and functional biodiversity', *Science of the Total Environment*, doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149671
26. F. Bastida, I.F. Torres, J. Abadía, C. Romero-Trigueros, A. Ruiz-Navarro, J.J. Alarcón, C. García, E. Nicolás (2018) 'Comparing the impacts of drip irrigation by freshwater and reclaimed wastewater on the soil microbial community of two citrus species', *Agricultural Water Management*, doi.org/10.1016/j.agwat.2018.03.001
27. Huseyin Husnu Kayikcioglu (2012) 'Short-term effects of irrigation with treated domestic wastewater on microbiological activity of a Vertic xerofluent soil under Mediterranean conditions', *Journal of Environmental Management*, doi:10.1016/j.jenvman.2011.12.034
28. Adewole T. Adetunji, Francis B. Lewu, Reckson Mulidzi, Bongani Ncube (2017) 'The biological activities of β -glucosidase, phosphatase and urease as soil quality indicators: a review', *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 17 (3), 794-807
29. Panpan Xu, Wenwen Feng, Hui Qian and Qiying Zhang, (2019) 'Hydrogeochemical Characterization and Irrigation Quality Assessment of Shallow Groundwater in the Central-Western Guanzhong Basin, China', *International Journal of Environmental Research and Public Health*, doi:10.3390/ijerph16091492