



ΣΧΟΛΗ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΤΡΟΦΙΜΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΟΙΝΟΥ, ΑΜΠΕΛΟΥ & ΠΟΤΩΝ

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕ ΘΕΜΑ:

**«Επεξεργασία υγρών αποβλήτων του οινοποιείου με αξιοποίηση των  
επεξεργασμένων υγρών για άρδευση και της επεξεργασμένης λάσπης  
για διάθεση στο αμπέλι»**

ΤΟΥ ΦΟΙΤΗΤΗ: ΛΥΜΠΕΡΟΠΟΥΛΟΥ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟΣ:

ΠΑΠΑΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΥ ΣΠΥΡΟΣ

Επίκουρος καθηγητής

DEGREE THESIS ON:

**«Processing of winery wastewater with utilization of the processed  
liquid waste for irrigation and the treated sludge for vineyard disposal»**

STUDENT NAME: LYMPEROPOULOS PANAGIOTIS

SUPERVISOR: PAPAKONSTANTINOU SPYROS, Assistant Professor

Αιγάλεω, Οκτώβριος 2024

Egaleo, October 2024



ΣΧΟΛΗ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΤΡΟΦΙΜΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΟΙΝΟΥ, ΑΜΠΕΛΟΥ & ΠΟΤΩΝ

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

**«Επεξεργασία υγρών αποβλήτων του οινοποιείου με αξιοποίηση των  
επεξεργασμένων υγρών για άρδευση και της επεξεργασμένης λάσπης  
για διάθεση στο αμπέλι»**

**Μέλη Εξεταστικής Επιτροπής συμπεριλαμβανομένου και του Εισηγητή**

**Η πτυχιακή εργασία εξετάστηκε από την κάτωθι Εξεταστική Επιτροπή και**

**κρίθηκε επαρκής:**

<b>Α/α</b>	<b>ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΥΜΟ/ΙΔΙΟΤΗΤΑ</b>	<b>ΨΗΦΙΑΚΗ ΥΠΟΓΡΑΦΗ</b>
1	Παπακωνσταντίνου Σπύρος Επίκουρος Καθηγητής (επιβλέπων)	
2	Χατζηλαζάρου Αρχοντούλα Καθηγήτρια	
3	Ταταρίδης Παναγιώτης Επίκουρος Καθηγητής	

### **ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ ΠΕΡΙ ΛΟΓΟΚΛΟΠΗΣ/ COPYRIGHT**

Ο κάτωθεν υπογράφων ΛΥΜΠΕΡΟΠΟΥΛΟΣ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ, με αριθμό μητρώου os171050 φοιτητής του Τμήματος Επιστημών Οίνου, Αμπέλου & Ποτών, της Σχολής Επιστημών Τροφίμων του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της πτυχιακής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από εμένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος. Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».

Ο Δηλών



## **Ευχαριστίες**

Για την εκπόνηση της παρούσας πτυχιακής εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά το επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Παπακωνσταντίνου για την άρτια συνεργασία του και την υπομονή του καθώς και την δυνατότητα που μου έδωσε να ασχοληθώ με αυτό το ενδιαφέρον θέμα, επιτρέποντάς μου μ' αυτόν τον τρόπο να εμπλουτίσω το γνωστικό μου επίπεδο.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για τη διαρκή ηθική στήριξη και την αγάπη τους καθ' όλη τη διάρκεια της φοίτησης μου στο Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής.

## Περίληψη

Η επεξεργασία και η αξιοποίηση των υγρών αποβλήτων και της λάσπης των οينوποιείων παρουσιάζουν σημαντικές περιβαλλοντικές και γεωργικές ευκαιρίες και προκλήσεις. Τα υγρά απόβλητα οينوποιείων, τα οποία χαρακτηρίζονται από υψηλό οργανικό φορτίο, θρεπτικά συστατικά και μεταβλητό pH, μπορούν να προκαλέσουν σοβαρή οικολογική καταστροφή εάν απορριφθούν ανεπεξέργαστα. Οι αποτελεσματικές τεχνολογίες επεξεργασίας, συμπεριλαμβανομένων της καθίζησης, της διήθησης, της αερόβιας και αναερόβιας χώνευσης και της διήθησης με μεμβράνες, είναι απαραίτητες για τη μείωση του ρυπαντικού φορτίου. Η αναερόβια χώνευση είναι ιδιαίτερα επωφελής, προσφέροντας παραγωγή βιοαερίου παράλληλα με την επεξεργασία των λυμάτων. Τα επεξεργασμένα λύματα μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν για άρδευση, παρέχοντας μια βιώσιμη πηγή νερού σε άνυδρες περιοχές και μειώνοντας τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις της απόρριψης λυμάτων. Ομοίως, η λάσπη των οينوποιείων, πλούσια σε οργανική ύλη και θρεπτικά συστατικά, απαιτεί προσεκτική διαχείριση λόγω των πιθανών περιβαλλοντικών κινδύνων που ενέχει. Προηγμένες μέθοδοι επεξεργασίας, όπως η πάχυνση, η αφυδάτωση, η κομποστοποίηση και η αναερόβια χώνευση, μετατρέπουν την λάσπη σε πολύτιμους πόρους. Η αφυδατωμένη και κομποστοποιημένη λάσπη μπορεί να χρησιμεύσει ως οργανικό εδαφοβελτιωτικό, ενισχύοντας τη γονιμότητα και τη δομή του εδάφους σε αμπελώνες και άλλες γεωργικές εκτάσεις. Η πρακτική αυτή υποστηρίζει την κυκλική οικονομία με την ανακύκλωση των αποβλήτων σε πολύτιμες γεωργικές εισροές, μειώνοντας την ανάγκη για συνθετικά λιπάσματα και προωθώντας βιώσιμες γεωργικές πρακτικές. Ποσοτικά, τα απόβλητα οينوποιείων παρουσιάζουν υψηλές τιμές βιοχημικής ζήτησης οξυγόνου (Biochemical Oxygen Demand, BOD) και χημικής ζήτησης οξυγόνου (Chemical Oxygen Demand, COD), με το BOD να κυμαίνεται από 1.000 έως 12.000 mg/L και το COD από 2.000 έως 25.000 mg/L. Τα ολικά αιωρούμενα στερεά (Total Suspended Solids, TSS) μπορεί να κυμαίνονται από 500 έως 5.000 mg/L και το pH κυμαίνεται συνήθως από 3 έως 5. Η λάσπη των οينوποιείων έχει συνήθως περιεκτικότητα σε ξηρή ύλη μεταξύ 15% και 40%, ενώ η οργανική ύλη συχνά υπερβαίνει το 60% του ξηρού βάρους. Οι συγκεντρώσεις θρεπτικών συστατικών στην λάσπη είναι σημαντικές, με τα επίπεδα αζώτου να κυμαίνονται από 1% έως 5% του ξηρού βάρους, φωσφόρου από 0,5% έως 3% και καλίου από 0,5% έως 2%. Η παρούσα διατριβή διερευνά την ολοκληρωμένη επεξεργασία των υγρών αποβλήτων και της

λάσπης του οινοποιείου, με στόχο την αξιοποίηση των επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων για άρδευση και της επεξεργασμένης λάσπης για χρήση στον αμπελώνα. Με την αντιμετώπιση των περιβαλλοντικών κινδύνων και την προώθηση της ανάκτησης πόρων, η προσέγγιση αυτή ενισχύει τη βιωσιμότητα στην αμπελουργική βιομηχανία, συμβάλλοντας στη βελτίωση της αποδοτικότητας των πόρων και της περιβαλλοντικής διαχείρισης.

## **Abstract**

The treatment and utilization of winery wastewater and sludge present significant environmental and agricultural opportunities and challenges. Winery wastewater, characterized by high organic load, nutrients, and variable pH, can cause severe ecological degradation if discharged untreated. Effective processing technologies, including sedimentation, filtration, aerobic and anaerobic digestion, and membrane filtration, are essential for reducing the pollutant load. Anaerobic digestion is particularly beneficial, offering biogas production alongside wastewater treatment. Treated wastewater can be repurposed for irrigation, providing a sustainable water source in arid regions and reducing the environmental impact of wastewater discharge. Similarly, winery sludge, rich in organic matter and nutrients, requires careful management due to its potential environmental hazards. Advanced treatment methods such as thickening, dewatering, composting, and anaerobic digestion transform sludge into valuable resources. Dewatered and composted sludge can serve as an organic soil amendment, enhancing soil fertility and structure in vineyards and other agricultural lands. This practice supports the circular economy by recycling waste into valuable agricultural inputs, reducing the need for synthetic fertilizers, and promoting sustainable agricultural practices. Quantitatively, winery wastewater exhibits high biochemical oxygen demand (BOD) and chemical oxygen demand (COD) values, with BOD ranging from 1,000 to 12,000 mg/L and COD from 2,000 to 25,000 mg/L. The total suspended solids (TSS) can range from 500 to 5,000 mg/L, and the pH usually ranges from 3 to 5. Winery sludge typically has a dry matter content between 15% and 40%, with organic matter often exceeding 60% of the dry weight. Nutrient concentrations in the sludge are significant, with nitrogen levels ranging from 1% to 5% of dry weight, phosphorus from 0.5% to 3%, and potassium from 0.5% to 2%. This thesis explores the integrated processing of winery wastewater and sludge, aiming to utilize treated liquid waste for irrigation and treated sludge for vineyard use. By addressing environmental risks and promoting resource recovery, this approach enhances sustainability within the wine industry, contributing to improved resource efficiency and environmental stewardship.

Περιεχόμενα	
ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ ΠΕΡΙ ΛΟΓΟΚΛΟΠΗΣ/ COPYRIGHT .....	3
Ευχαριστίες .....	4
Περίληψη .....	5
Abstract .....	7
Περιεχόμενα εικόνων .....	10
Περιεχόμενα Πινάκων .....	10
Κατάλογος συντομεύσεων .....	11
Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή .....	13
1.1 Σύνθεση υγρών αποβλήτων οινοποιείου και προκλήσεις .....	13
1.2 Η ρύπανση των φυσικών πόρων από τα μη επεξεργασμένα υγρά απόβλητα .....	14
1.3 Αναγκαιότητα για την επεξεργασία των υγρών αποβλήτων και της λάσπης .....	14
1.4 Τεχνολογίες επεξεργασίας υγρών αποβλήτων οινοποιείου και λάσπης .....	15
1.5 Αξιοποίηση επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων οινοποιείου για άρδευση .....	16
1.6 Αξιοποίηση της επεξεργασμένης λάσπης στη διαχείριση του αμπελώνα .....	16
Κεφάλαιο 2: Ο χειρισμός των υγρών αποβλήτων των οινοποιείων .....	18
2.1 Διαθέσιμες επιλογές για την επεξεργασία υγρών αποβλήτων οινοποιείου .....	19
2.2 Βιολογική επεξεργασία λυμάτων ελεύθερων επιφανειακών υδάτων .....	19
2.3 Συμβατική ενεργή λάσπη .....	21
2.4 Αναερόβια χώνευση .....	22
Κεφάλαιο 3: Ποιοτικά και Ποσοτικά Χαρακτηριστικά και Μεθοδολογίες Διαχείρισης των αποβλήτων .....	26
3.1 Μεθοδολογίες Διαχείρισης Υγρών Αποβλήτων .....	28
3.1.1 Προκαταρκτική επεξεργασία υγρών αποβλήτων οινοποιείου .....	29
3.1.2 Πρωτογενείς φυσικοχημικές μέθοδοι επεξεργασίας .....	29
3.1.3 Μέθοδοι βιολογικής επεξεργασίας .....	30
3.1.4 Αερόβια επεξεργασία .....	31
3.1.5 Αναερόβια επεξεργασία .....	31



3.1.6	Τεχνητοί υδροβιότοποι .....	35
3.2	Θεσμοί που συμμετέχουν σε επιθεωρήσεις οινοποιείων .....	38
3.3	Ποιοτικός έλεγχος των επεξεργασμένων υγρών για άρδευση .....	40
Κεφάλαιο 4: Εφαρμογή των επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων στην άρδευση και της επεξεργασμένης λάσπης στο έδαφος .....		41
4.1	Όγκος Νερού Που Χρησιμοποιείται Από Την Οινοποιία .....	42
4.2	Όγκος υγρών αποβλήτων που παράγονται κατά την οινοποίηση .....	43
4.3	Πρόελευση Των Υγρών Αποβλήτων Οινοποιείου Και Των Σχετικών Ρύπων .....	44
4.3.1	Πηγές ρύπων .....	44
4.3.2	Ποιότητα των υγρών αποβλήτων που παράγονται στα οινοποιεία .....	45
4.4	Διαχείριση Υγρών Αποβλήτων Οινοποιείου .....	47
4.5	Διάθεση ή αξιοποίηση υγρών αποβλήτων οινοποιείου .....	48
4.5.1	Επιστροφή στους φυσικούς πόρους .....	48
4.5.2	Δεξαμενές διάθεσης .....	49
4.5.3	Άρδευση με υγρά απόβλητα οινοποιείου .....	49
4.5.4	Καλλιέργειες που αρδεύονται με υγρά απόβλητα οινοποιείου .....	49
4.5.5	Συστήματα άρδευσης που χρησιμοποιούνται για τη διάθεση των υγρών αποβλήτων του οινοποιείου .....	50
4.5.6	Επιδράσεις των υγρών αποβλήτων οινοποιείου στις εδαφικές συνθήκες .....	51
4.6	Επίδραση της άρδευσης με αστικά λύματα στις ιδιότητες του εδάφους .....	56
4.7	Χρήση της λάσπης λυμάτων ως λίπασμα στο έδαφος .....	64
4.7.1	Επιδράσεις της εφαρμογής λάσπης λυμάτων στις ιδιότητες του εδάφους ...	65
4.7.2	Επιβλαβείς επιπτώσεις .....	66
Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα .....		68
Βιβλιογραφία .....		70

## Περιεχόμενα εικόνων

Εικόνα 1: Αναερόβια χώνευση με χρήση βιοαντιδραστήρα αναερόβιας μεμβράνης πλευρικού ρεύματος (Khan et al., 2020).....	23
Εικόνα 2: Αναερόβιος αντιδραστήρας ανοδικής ροής διαμέσου στιβάδας λάσπης (Bolzonella et al., 2019).....	25
Εικόνα 3: Διαδικασία πήξης και κροκίδωσης για την επεξεργασία υγρών αποβλήτων (The et al., 2016).....	29
Εικόνα 4: Σχέδιο της εγκατάστασης πλήρους κλίμακας για την επεξεργασία υγρών αποβλήτων οινοποιείου (Eusebio et al., 2004).....	30
Εικόνα 5: Τυπική αερόβια επεξεργασία υγρών αποβλήτων (Alisawi, 2020).....	31
Εικόνα 6: Βιοαντιδραστήρες αναερόβιων μεμβρανών (Chang et al., 2014) <b>Error! Bookmark not defined.</b>	
Εικόνα 7: Τεχνητοί Υδροβιότοποι και οφέλη τους (Milani, 2021).....	38
Εικόνα 8: Συμβατικοί ρύποι στα υγρά απόβλητα οινοποιείων όπως αναφέρονται στη βιβλιογραφία (Skornia et al., 2020).....	44
Εικόνα 9: Τμήμα της κατακόρυφης υπόγειας κλίνης ροής που βρίσκεται στο οινοποιείο Marabino (Milani et al., 2020).....	48
Εικόνα 10: Διάταξη του πολυβάθμιου πιλοτικού τεχνητού υδροβιότοπου (Constructed Waterland, CW) που βρίσκεται στο οινοποιείο Marabino. Η άρδευση του πραγματοποιείται μέσω υγρών αποβλήτων οινοποιείου(Baker & Hinze, 2007).....	51

## Περιεχόμενα Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 1: Επίδραση της άδρευσης στην συγκέντρωση του φωσφότου για 4 είδη νερού.....	59
Διάγραμμα 2: Επίδραση της άδρευσης με επεξεργασμένα απόβλητα (TWW), νερό πηγαδιού (WW) στη SAR, σε σύγκριση με νερό βροχής (RF) (Netzer et al., 2014).....	61

## Περιεχόμενα Πινάκων

Πίνακας 1: Επίδραση των τροποποιήσεων της λάσπης λυμάτων σε επιλεγμένες φυσικές, χημικές και βιολογικές ιδιότητες του εδάφους Singh and Agrawal, 2008).....	66
Πίνακας 2: Προτεινόμενες οριακές τιμές για τα δυνητικά τοξικά στοιχεία (PTE) στην ιλύ λυμάτων και στο έδαφος (mg kg <sup>-1</sup> dw) (European.....	67
Πίνακας 3: Πρότυπα για τις μέγιστες συγκεντρώσεις παθογόνων μικροοργανισμών στην λάσπη λυμάτων (European Commission, 2009).....	67

## Κατάλογος συντομεύσεων

- COD: Chemical Oxygen Demand, χημική ζήτηση οξυγόνου
- BOD: Biochemical Oxygen Demand, βιοχημική ζήτηση οξυγόνου
- TSS: Total Soluble Solids, ολικά διαλυτά στερεά
- WWW: Winery Wastewater, υγρά απόβλητα οινοποιείου
- ΕΕΛ: εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων
- BSO: Biodegradable Soluble Organics, βιοαποικοδομήσιμα οργανικά υλικά
- WWWT: Winery Wastewater Treatment, διαχείριση υγρών απόβλητων οινοποιείου
- CW: Constructed Wetlands, τεχνητοί υδροβιότοποι
- SCFA: Short-Chain Fatty Acid, λιπαρό οξύ βραχείας ανθρακικής αλυσίδας
- CAS: Conventional Activated Sludge, ενεργή λάσπη
- JLR: Jet-Loop Reactor, αντιδραστήρας jet-loop
- OPEX: operation and maintenance cost, κόστος λειτουργίας και συντήρησης
- AD: Anaerobic Digestion, αναερόβια χώνευση
- UASB: Upflow Anaerobic Sludge Reactor, αναερόβιος αντιδραστήρας ανοδικής ροής διαμέσου στιβάδας λάσπης
- HRT: Hydraulic Retention Time, υδραυλικός χρόνος κατακράτησης
- SRT: Solid Retention Time, χρόνος κατακράτησης στερεών
- OLR: Organic Loading Rate, ρυθμός οργανικού φορτίου
- EC: Electric Conductivity, ηλεκτρική αγωγιμότητα
- AnSBR: Anaerobic Sequencing Batch Reactor, αναερόβιος αντιδραστήρας ασυνεχούς τροφοδότησης
- HF: Horizontal Flow, οριζόντια υπόγεια ροή
- VF: Vertical Flow, κατακόρυφη υπόγεια ροή
- FSF: Free Space Flow, ελεύθερη υπόγεια ροή
- FC: *Firmicutes*
- DALY: Disability-adjusted life years, προσαρμοσμένα στην αναπηρία έτη ζωής
- EGSB: Expanded Granular Sludge Bed, διευρυμένη κοκκώδης κλίνη λάσπης
- ECe: Saturated Paste Extract, κορεσμένο εδαφικό εκχύλισμα
- OY: Οργανική ύλη
- TOC: Total Organic Carbon, ολικός οργανικός άνθρακας
- OA: Οργανικός άνθρακας

WWTW: Wastewater treatment Works, εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων

SAR: Sodium Absorption Ratio, ρυθμός απορρόφησης νατρίου

PAR: Potassium Absorption Ratio, ρυθμός απορρόφησης καλίου

## **Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή**

Τα υγρά απόβλητα των οινοποιείων, που συχνά χαρακτηρίζονται από υψηλό οργανικό φορτίο και μεταβλητή σύνθεση, θέτουν σημαντικές περιβαλλοντικές προκλήσεις εάν δεν τύχουν κατάλληλης διαχείρισης. Με την εκρηκτική ανάπτυξη της βιομηχανίας οίνου παγκοσμίως, ο όγκος των υγρών αποβλήτων που παράγονται από τις λειτουργίες των οινοποιείων έχει κλιμακωθεί, γεγονός που καθιστά αναγκαίες αποτελεσματικές στρατηγικές επεξεργασίας για τον μετριασμό της πιθανής οικολογικής βλάβης. Ταυτόχρονα, η βιώσιμη αξιοποίηση των επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων οινοποιείου (Wine Wastewater, WWW) έχει συγκεντρώσει την προσοχή, ιδίως σε γεωργικά περιβάλλοντα όπου επικρατεί λειψυδρία. Η παρούσα πτυχιακή εργασία ερευνά την επεξεργασία των υγρών αποβλήτων οινοποιείου με στόχο την αξιοποίηση των επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων για άρδευση και της προκύπτουσας λάσπης για χρήση στον αμπελώνα. Με την ενσωμάτωση της επεξεργασίας υγρών αποβλήτων με γεωργικές πρακτικές, η προσέγγιση αυτή όχι μόνο αντιμετωπίζει περιβαλλοντικές ανησυχίες, αλλά προσφέρει επίσης δυνητικά οφέλη για την παραγωγικότητα και τη βιωσιμότητα του αμπελώνα. Στα επόμενα κεφάλαια θα αναπτυχθούν αναλυτικά:

- Η σύνθεση των υγρών αποβλήτων και της λάσπης
- Οι τεχνολογίες επεξεργασίας τους
- Πως τα επεξεργασμένα υγρά απόβλητα μπορούν να αξιοποιηθούν στην άρδευση
- Πως αξιοποιείται η επεξεργασμένη λάσπη

### **1.1 Σύνθεση υγρών αποβλήτων οινοποιείου και προκλήσεις**

Η σύνθεση των υγρών αποβλήτων των οινοποιείων είναι πολύπλοκη και ποικίλλει ανάλογα με παράγοντες όπως η ποικιλία σταφυλιών, οι μέθοδοι επεξεργασίας και οι πρακτικές των εγκαταστάσεων. Συνήθως περιέχουν υψηλά επίπεδα οργανικής ύλης, θρεπτικών συστατικών (άζωτο και φώσφορο), αιωρούμενων στερεών και διαφόρων χημικών ενώσεων, όπως πολυφαινόλες, σάκχαρα και οξέα (Bories et al., 2018). Αυτή η ποικίλη σύνθεση παρουσιάζει προκλήσεις για τις συμβατικές διεργασίες επεξεργασίας υγρών αποβλήτων, καθιστώντας συχνά αναγκαίες προσαρμοσμένες προσεγγίσεις για την αποτελεσματική απομάκρυνση των ρύπων.

## **1.2 Η ρύπανση των φυσικών πόρων από τα μη επεξεργασμένα υγρά απόβλητα**

Τα υγρά απόβλητα οινοποιείων ενέχουν περιβαλλοντικούς κινδύνους εάν απορρίπτονται ανεπεξέργαστα ή ανεπαρκώς επεξεργασμένα. Η οργανική ύλη και τα θρεπτικά συστατικά που υπάρχουν μπορούν να οδηγήσουν σε ευτροφισμό των υδάτινων σωμάτων υποδοχής, διαταράσσοντας τα υδάτινα οικοσυστήματα και θέτοντας σε κίνδυνο την ποιότητα των υδάτων (Mansouri et al., 2020). Επιπλέον, η παρουσία δυνητικά τοξικών ενώσεων, όπως φυτοφάρμακα και βαρέα μέταλλα, υπογραμμίζει την ανάγκη για ολοκληρωμένη επεξεργασία για τη διασφάλιση της περιβαλλοντικής και ανθρώπινης υγείας.

## **1.3 Αναγκαιότητα για την επεξεργασία των υγρών αποβλήτων και της λάσπης**

Η επεξεργασία των υγρών αποβλήτων οινοποιείου είναι ζωτικής σημασίας λόγω των σημαντικών περιβαλλοντικών και κανονιστικών προβλημάτων που θέτει. Η παραγωγή οίνου παράγει μεγάλους όγκους υγρών αποβλήτων πλούσιων σε οργανική ύλη, θρεπτικά συστατικά και διάφορες χημικές ενώσεις, τα οποία, εάν απορριφθούν ανεπεξέργαστα, μπορεί να οδηγήσουν σε σοβαρή οικολογική καταστροφή. Τα ανεπεξέργαστα απόβλητα οινοποιείων μπορούν να προκαλέσουν ευτροφισμό στα υδάτινα σώματα, οδηγώντας σε υπερανάπτυξη των φυκών, εξάντληση του οξυγόνου και επακόλουθη βλάβη στην υδρόβια ζωή (Mansouri et al., 2020). Επιπλέον, η παρουσία πολυφαινολών, φυτοφαρμάκων και βαρέων μετάλλων στα υγρά απόβλητα μπορεί να είναι τοξική τόσο για τα χερσαία όσο και για τα υδάτινα οικοσυστήματα, γεγονός που καθιστά αναγκαία την εφαρμογή αυστηρών μέτρων επεξεργασίας για την πρόληψη της μόλυνσης του περιβάλλοντος. Η συμμόρφωση με τους περιβαλλοντικούς κανονισμούς και τα πρότυπα που θέτουν οι κυβερνητικοί φορείς υπογραμμίζει περαιτέρω την ανάγκη για αποτελεσματική επεξεργασία των υγρών αποβλήτων. Η μη τήρηση αυτών των προτύπων μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικά πρόστιμα και διακοπή λειτουργίας, επηρεάζοντας την οικονομική βιωσιμότητα των οινοποιείων (Cespedes et al., 2019).

Εκτός από τις περιβαλλοντικές και κανονιστικές παραμέτρους, η επεξεργασία των υγρών αποβλήτων των οινοποιείων ευθυγραμμίζεται με τους ευρύτερους στόχους βιωσιμότητας στον κλάδο του κρασιού. Η αποτελεσματική διαχείριση των υγρών αποβλήτων μπορεί να μετατρέψει μια πιθανή υποχρέωση σε πολύτιμο πόρο, προωθώντας την κυκλική οικονομία. Τα επεξεργασμένα υγρά απόβλητα μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν για άρδευση, παρέχοντας μια αξιόπιστη πηγή νερού σε περιοχές

με έλλειψη νερού και μειώνοντας την επιβάρυνση των αποθεμάτων γλυκού νερού (Ciria et al., 2019). Επιπλέον, η λάσπη που παράγεται από τη διαδικασία επεξεργασίας μπορεί να αξιοποιηθεί ως οργανικό βελτιωτικό σε αμπελώνες, ενισχύοντας την υγεία και τη γονιμότητα του εδάφους. Αυτή η διπλή αξιοποίηση όχι μόνο περιορίζει το περιβαλλοντικό αποτύπωμα των οινοποιείων, αλλά και υποστηρίζει βιώσιμες γεωργικές πρακτικές. Επενδύοντας σε προηγμένες τεχνολογίες επεξεργασίας υγρών αποβλήτων, τα οινοποιεία μπορούν να ενισχύσουν την περιβαλλοντική τους διαχείριση, να βελτιώσουν την αποδοτικότητα των πόρων και να ενισχύσουν τη φήμη τους για βιωσιμότητα σε μια αγορά με αυξανόμενη οικολογική συνείδηση (Bories et al., 2018).

#### **1.4 Τεχνολογίες επεξεργασίας υγρών αποβλήτων οινοποιείου και λάσπης**

Έχουν διερευνηθεί διάφορες τεχνολογίες επεξεργασίας για την αποτελεσματική αποκατάσταση των υγρών αποβλήτων οινοποιείων, που περιλαμβάνουν φυσικές, χημικές και βιολογικές διεργασίες. Οι συνήθως χρησιμοποιούμενες μέθοδοι περιλαμβάνουν τις φυσικές μεθόδους, όπως την καθίζηση, τη διήθηση, την ενεργό λάσπη, τη βιολογική οξείδωση και τη διήθηση με μεμβράνες, οι οποίες χρησιμοποιούνται συχνά για την αρχική απομάκρυνση των στερεών ενώ οι χημικές επεξεργασίες που περιλαμβάνουν την πήξη και την κροκίδωση μπορούν να ενισχύσουν την απομάκρυνση των αιωρούμενων σωματιδίων και των διαλυμένων ουσιών (Bories et al., 2018). Κάθε προσέγγιση προσφέρει διακριτά πλεονεκτήματα και περιορισμούς όσον αφορά την αποτελεσματικότητα, την αποδοτικότητα και την επεκτασιμότητα.

Οι βιολογικές επεξεργασίες, όπως η αερόβια και η αναερόβια χώνευση, έχουν αποκτήσει εξέχουσα θέση λόγω της ικανότητάς τους να αποικοδομούν τους οργανικούς ρύπους και να μειώνουν τις συγκεντρώσεις θρεπτικών ουσιών (Cespedes et al., 2019). Η αναερόβια χώνευση, ειδικότερα, είναι αξιοσημείωτη για το διπλό πλεονέκτημά της, δηλαδή την επεξεργασία των λυμάτων και την παραγωγή βιοαερίου, μιας ανανεώσιμης πηγής ενέργειας (Mansouri et al., 2020). Ωστόσο, προκλήσεις όπως η σταθερότητα της διεργασίας και η μεταβλητότητα των χαρακτηριστικών των εισερχομένων απαιτούν προσεκτικό σχεδιασμό και παρακολούθηση της διεργασίας.

### **1.5 Αξιοποίηση επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων οινοποιείου για άρδευση**

Η αξιοποίηση επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων οινοποιείου για άρδευση παρουσιάζει μια βιώσιμη λύση για την μείωση των προβλημάτων λειψυδρίας σε γεωργικές περιοχές, ιδίως σε ξηρά και ημίξηρα κλίματα. Τα επεξεργασμένα υγρά απόβλητα, όταν υποβάλλονται σε κατάλληλη επεξεργασία, μπορούν να χρησιμεύσουν ως πολύτιμος υδάτινος πόρος για την άρδευση καλλιεργειών, μειώνοντας την εξάρτηση από πηγές γλυκού νερού και περιορίζοντας τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις της απόρριψης υγρών αποβλήτων (Ciria et al., 2019). Ωστόσο, οι ανησυχίες σχετικά με τους πιθανούς κινδύνους που συνδέονται με την εφαρμογή υγρών αποβλήτων για άρδευση, όπως η μόλυνση του εδάφους και η πρόσληψη ρυπαντών από τις καλλιέργειες, υπογραμμίζουν τη σημασία των αυστηρών πρωτοκόλλων επεξεργασίας και παρακολούθησης.

### **1.6 Αξιοποίηση της επεξεργασμένης λάσπης στη διαχείριση του αμπελώνα**

Εκτός από την αξιοποίηση του υγρού κλάσματος των επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων οινοποιείου, η λάσπη που παράγεται κατά την επεξεργασία των υγρών αποβλήτων ενέχει δυνατότητες για ευεργετικές γεωργικές εφαρμογές, ιδίως στη διαχείριση αμπελώνων. Η πλούσια σε θρεπτικά συστατικά λάσπη μπορεί να χρησιμεύσει ως οργανικό «εδαφοβελτιωτικό» (soil amendment), ενισχύοντας τη γονιμότητα του εδάφους και προάγοντας την υγεία και την παραγωγικότητα της αμπέλου (Fabbri et al., 2021). Επιπλέον, η εφαρμογή της λάσπης μπορεί να συμβάλει στη δέσμευση οργανικού άνθρακα στο έδαφος και να βελτιώσει τη δομή του εδάφους, υποστηρίζοντας έτσι τη μακροπρόθεσμη βιωσιμότητα και ανθεκτικότητα των οικοσυστημάτων του αμπελώνα.

Οι προηγμένες επιλογές επεξεργασίας, όπως οι βιοαντιδραστήρες μεμβρανών (MBR) και οι τεχνητοί υγροβιότοποι, προσφέρουν υψηλή απόδοση στην απομάκρυνση ευρέος φάσματος ρυπαντών, παρέχοντας επεξεργασμένο νερό κατάλληλο για επαναχρησιμοποίηση στην άρδευση (Ciria et al., 2019). Για τη διαχείριση της λάσπης, χρησιμοποιούνται συνήθως τεχνολογίες όπως η πήξη (thickening), η αφυδάτωση (dewatering), η κομποστοποίηση (composting) και η αναερόβια χώνευση. Η αφυδάτωση μειώνει τον όγκο της λάσπης, διευκολύνοντας τον χειρισμό και τη μεταφορά της. Η κομποστοποίηση μετατρέπει την λάσπη σε σταθερό, πλούσιο σε θρεπτικά συστατικά οργανικό λίπασμα κατάλληλο για γεωργική χρήση, ενισχύοντας τη γονιμότητα και τη δομή του εδάφους. Οι θερμικές διεργασίες, όπως η ξήρανση και η αποτέφρωση, μπορούν να μειώσουν περαιτέρω τον όγκο της λάσπης και να καταστρέψουν τους παθογόνους



μικροοργανισμούς, αν και αυτές οι μέθοδοι απαιτούν σημαντική ενεργειακή κατανάλωση (Fabbri et al., 2021). Με την ενσωμάτωση αυτών των τεχνολογιών, τα οينوποιεία μπορούν να διαχειριστούν αποτελεσματικά τα υγρά απόβλητα και την λάσπη, μετατρέποντας τα απόβλητα σε πολύτιμους πόρους και ελαχιστοποιώντας παράλληλα τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

## **Κεφάλαιο 2: Ο χειρισμός των υγρών αποβλήτων των οινοποιείων**

Ο κακός χειρισμός των υγρών αποβλήτων των οινοποιείων (winery wastewater, WWW) αφήνει μη βιώσιμες επιπτώσεις στην παγκόσμια παραγωγή κρασιού. Η διαδικασία της έκθλιψης των σταφυλιών σε γλεύκος, ο καθαρισμός των βαρελιών και άλλου εξοπλισμού αποθήκευσης ή μεταφοράς, το ξέπλυμα και η απομάκρυνση των συγκομισμένων σταφυλιών, καθώς και η συσσώρευση του γλεύκους και των απωλειών οίνου στο ρεύμα αποβλήτων αποτελούν τις πηγές των WWW (Bolzonella et al., 2019). Τα ακατέργαστα WWW ορίζονται συνήθως στη βιβλιογραφία ως ένα μείγμα εξαιρετικά διαλυτών και βιοαποικοδομήσιμων οργανικών υλικών σε γλυκό νερό, συμπεριλαμβανομένων πρωτεϊνών, πολυπεπτιδίων και πολυσακχαριτών, καθώς και διαλυμένων αλάτων, ανόργανων συστατικών και χαμηλότερων συγκεντρώσεων ιόντων βαρέων μετάλλων, καθώς και άλλων ενώσεων που είναι φυτοτοξικές και ανθεκτικές (Vital-Jacome et al., 2020).

Για να πληρούνται τα πρότυπα ποιότητας των εκροών για την απελευθέρωση σε φυσικούς υδάτινους πόρους ή για να είναι επιλέξιμες για την ανάκτηση υγρών αποβλήτων σε εφαρμογές πόσιμου και μη πόσιμου νερού, οι ακατέργαστες εκροές πρέπει να υποβάλλονται σε επεξεργασία από ένα οινοποιείο. Ακόμα και τα επεξεργασμένα WWW που πληρούν τις κανονιστικές απαιτήσεις μπορεί να μην επιτρέπονται για τους σκοπούς αυτούς (Massara et al., 2017).

Η πλειονότητα των τεχνικών διάθεσης στο έδαφος που χρησιμοποιούνται σήμερα, οι οποίες προέρχονται από προηγούμενες κοινωνίες που διέθεταν τα αστικά και γεωργικά απόβλητα χρησιμοποιώντας λίμνες και συστήματα άρδευσης, βασίζονται κυρίως στην εξάτμιση και τη διαπερατότητα του εδάφους (Almuktar et al., 2018).

Παρόμοιες μέθοδοι χρησιμοποιούνται στα οινοποιεία, όπου τα επεξεργασμένα WWW χρησιμοποιούνται για την άρδευση των γύρω καλλιεργούμενων εκτάσεων, των λιβαδιών και των βοσκοτόπων μέσω λιμνών διάθεσης ή φραγμάτων. Σε μια προσπάθεια να «κλείσει» περαιτέρω ο κύκλος μεταξύ της διάθεσης των WWW και της παροχής πόρων, τα ευρωπαϊκά οινοποιεία ανακυκλώνουν μέρος του ανεπεξέργαστων WWW σε κοντινά αποστακτήρια, προκειμένου να ανακτήσουν τα υλικά που έχουν απομείνει, όπως τρυγικό ασβέστιο, αιθυλική αλκοόλη, σπόρους σταφυλιών και λίπασμα. Παρ' όλα αυτά, η πλειονότητα των WWW και άλλων υπολειμματικών υλικών σπαταλώνται επειδή τα τρέχοντα συστήματα επεξεργασίας υγρών αποβλήτων δεν είναι βελτιστοποιημένα ώστε να παρέχουν οικονομικά αποδοτικές λύσεις ανάκτησης πόρων για την εξοικονόμηση εμπορευμάτων και φυσικών πόρων (Basset Olivé, 2015).

Οι ερευνητές επισημαίνουν επίσης ότι η αναποτελεσματική διαχείριση των WWW επιβαρύνει όλο και περισσότερο τους οικονομικούς και ανθρώπινους πόρους, ένα πρόβλημα που πρέπει να επιλυθεί με πρακτικές και αποτελεσματικές λύσεις. Αναμφίβολα, η διαδικασία παραγωγής κρασιού χρησιμοποιεί πολύ νερό, ιδίως αν ληφθεί υπόψη πόσο γρήγορα καταναλώνεται το γλυκό νερό κατά μήκος της αλυσίδας εφοδιασμού. Κατά τη διάρκεια του τρύγου, τα οινοποιεία χρησιμοποιούν μεταξύ 2,0 και 5,0 m<sup>3</sup> γλυκού νερού ανά τόνο σταφυλιών ετησίως, το οποίο αποτελεί το 30 έως 40 % του ετήσιου υδάτινου αποτυπώματος (Congradie, 2015).

### **2.1 Διαθέσιμες επιλογές για την επεξεργασία υγρών αποβλήτων οινοποιείου**

Πολλές δημοτικές εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων (ΕΕΛ) και οινοποιεία που διαθέτουν ιδιωτικές εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων έχουν καθιερώσει βιολογική επεξεργασία λυμάτων πλήρους κλίμακας (Bolzonella et al., 2019). Η βιολογική επεξεργασία υγρών αποβλήτων χρησιμοποιεί διαλυτά και γρήγορα βιοαποικοδομήσιμα οργανικά υλικά (Biodegradable Soluble Organics, BSOs) από τα λύματα για να τροφοδοτήσει τις απαιτούμενες αποικοδομητικές και μεταβολικές βιοδιαδικασίες, για την απομάκρυνση των ρύπων από τα λύματα. Τα συστήματα αυτά μπορούν να σχεδιαστούν ως δεξαμενές καθίζησης, βιοαντιδραστήρες και άλλες αερόβιες και/ή αναερόβιες τεχνολογίες ακινητοποιημένων και αιωρούμενων μικροοργανισμών, ή μπορούν να υπάρχουν στη φύση ως καθορισμένες λίμνες επεξεργασίας λυμάτων, λιμνοθάλασσες και τεχνητοί υδροβιότοποι. Δεδομένης της αφθονίας οργανικών υλικών στο υπόστρωμα που μπορούν να διασπαστούν με βιολογικές διεργασίες, τα ακατέργαστα υγρά απόβλητα οινοποιείων είναι ένας πολύ καλός υποψήφιος για βιολογική επεξεργασία υγρών αποβλήτων. Ωστόσο, υπάρχουν ορισμένα μειονεκτήματα στα συστήματα βιολογικής επεξεργασίας λυμάτων, συμπεριλαμβανομένης της αδυναμίας προσαρμογής τους στις μεταβαλλόμενες περιβαλλοντικές συνθήκες. Οι ερευνητές εξέτασαν συγκεκριμένα τα συστήματα διαχείρισης υγρών αποβλήτων οινοποιείου (Winery Wastewater Treatment, WWWT) που χρησιμοποιούν αναερόβια χώνευση, τη συμβατική βιοτεχνολογία ενεργού λάσπης και τα ελεύθερα επιφανειακά υδάτινα σώματα (Almuktar et al., 2018).

### **2.2 Βιολογική επεξεργασία λυμάτων ελεύθερων επιφανειακών υδάτων**

Οι έρευνες καταγράφουν την επεξεργασία δεξαμενών ελεύθερης επιφάνειας των υγρών αποβλήτων ως την πιο πρακτική επιλογή για WWWT για οινοποιεία με μεγάλες εκτάσεις

γης και μέτριες διαστάσεις διαμερισμάτων, αλλά αυτό μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα ένα περιβάλλον υπό πίεση. Αρκετά οινοποιεία στην περιοχή Νιαγάρα του Καναδά διαχειρίζονται τα υγρά απόβλητα και τα λύματα επί τόπου χρησιμοποιώντας δεξαμενές πρωτοβάθμιας καθίζησης, τεχνητούς υγροβιότοπους (Constructed Wetlands, CW) και αεριζόμενες λιμνοδεξαμενές. Ωστόσο, έκτοτε αντιμετωπίζουν προβλήματα διάθεσης των λυμάτων καθ' όλη τη διάρκεια της χειμερινής και φθινοπωρινής περιόδου (Σεπτέμβριος έως Δεκέμβριος). Στη Νιαγάρα, απαγορεύεται νομικά η άρδευση με WWW όταν οι θερμοκρασίες είναι κάτω από το μηδέν (σε σημείο που να σχηματίζεται πάγος στο έδαφος). Ως αποτέλεσμα, τα φορτία WWW υψηλού όγκου δεν μπορούν να αποθηκευτούν ανεξάρτητα σε δεξαμενές καθίζησης (Johnson & Mehrgar, 2020).

Επιπλέον, κατά τη συνεπεξεργασία αστικών λυμάτων με ακατέργαστα WWW σε χαμηλές θερμοκρασίες, οι ερευνητές έχουν διαπιστώσει σημαντική προσωρινή υπερφόρτωση των εγκαταστάσεων στις δημοτικές ΕΕΛ, η οποία μειώνει την ανάκτηση και την ανακύκλωση των λυμάτων. Αυτές οι καταστάσεις θα μπορούσαν επίσης να εμφανιστούν κατά τη διάρκεια αυτής της χρονικής περιόδου, σύμφωνα με μια μεταγενέστερη μελέτη σχετικά με τη διαχείριση των WWW του Νιαγάρα (Johnson & Mehrgar, 2020). Οι δημοτικές ΕΕΛ διαχειρίζονται διάφορους τύπους υγρών αποβλήτων και ενδέχεται να μην διαθέτουν το κατάλληλο υλικό εκκίνησης ή τις λειτουργικές τροποποιήσεις που απαιτούνται για την αποτελεσματική συνεπεξεργασία των αστικών λυμάτων και των υγρών αποβλήτων. Ως εκ τούτου, τα επεξεργασμένα WWW μπορούν ακόμη να επιταχύνουν τις περιπτώσεις υποξίας και άνθισης φυκιών στα ελεύθερα επιφανειακά ύδατα και να συνεχίσει να συμβάλλει στη ρύπανση, τον ευτροφισμό και την συσσώρευση αλάτων στο φυσικό οικοσύστημα μετά την απελευθέρωσή τους (Almuktar et al., 2018).

Επιπλέον, οι συνθήκες διαβίωσης των κατοίκων είναι υποβαθμισμένες λόγω της δυσάρεστης οσμής των λιπαρών οξέων μικρής αλυσίδας (SCFAs), καθώς και των ιόντων θείου, όπως των  $SO_3^{2-}$  και  $SO_4^{2-}$ , τα οποία συσσωρεύονται σε αργά κινούμενα, ελεύθερα επιφανειακά ύδατα (Lofrano & Meric, 2016). Οι αεριστήρες είναι μηχανικές, ηλεκτροκίνητες συσκευές που χρησιμοποιούνται συχνά στην αερόβια επεξεργασία λυμάτων για τη μεταφορά οξυγόνου στα λύματα και τη μείωση των δυσάρεστων οσμών. Λόγω της ηχορύπανσης που προκαλούν, οι αεριστήρες μπορούν συχνά να προκαλέσουν ενοχλήσεις στους κατοίκους της περιοχής (Howell & Myburgh, 2018).

Αυτά τα συστήματα WWWT δεν πληρούν τις απαιτήσεις για βιώσιμη διαχείριση των WWW, καθώς υπάρχει πιθανότητα να διακοπεί η επεξεργασία των λυμάτων, παράγοντας δυσάρεστες οσμές και θόρυβο στις αμπελουργικές περιοχές.

### 2.3 Συμβατική ενεργή λάσπη

Το παραδοσιακό σύστημα ενεργής λάσπης (Conventional Activated Sludge, CAS) παρουσιάστηκε για πρώτη φορά πριν από περισσότερα από 20 χρόνια λόγω της εξαιρετικά αξιόπιστης, αποτελεσματικής και απλής λύσης επεξεργασίας λυμάτων. Ωστόσο, επί του παρόντος, το CAS είναι ενεργειακά αναποτελεσματικό και ενδέχεται να είναι πολύ δύσκαμπτο για να διαχειριστεί τα εποχικά φορτία των WWW. Τροποποιώντας αυτές τις κρίσιμες παραμέτρους στα υγρά απόβλητα, ένας βιοαντιδραστήρας μπορεί να απομακρύνει όσο το δυνατόν πιο αποτελεσματικά τη χημική ζήτηση οξυγόνου (COD) και να επιτύχει αποτελεσματικότητα επεξεργασίας έως και 98,0%.

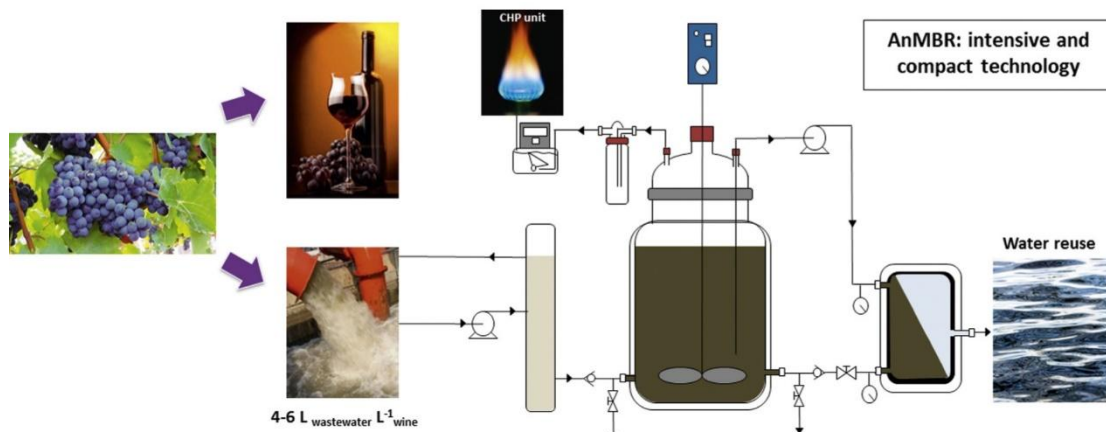
Τα αεριζόμενα συστήματα επεξεργασίας νερού για WWW έχουν συνδεθεί στη βιβλιογραφία με υπερβολική χρήση ενέργειας (Andreottola et al., 2009), ιδίως κατά την περίοδο του τρύγου, όταν οι επιφανειακοί αεριστήρες είναι σημαντικά λιγότερο αποτελεσματικοί. Παρόλο που ο αντιδραστήρας jet-loop (Jet-Loop Reactor, JLR) είναι μια πιθανή αντικατάσταση των μηχανικών αεριστήρων, μόνο εφαρμογές πιλοτικής κλίμακας έχουν δοκιμαστεί και αναφερθεί μέχρι στιγμής για την τεχνολογία αυτή. Ως αποτέλεσμα, τα συστήματα CAS μπορεί να βασίζονται σημαντικά στις δημοτικές ΕΕΛ για τον έλεγχο των ρυπαντικών φορτίων κατά τη διάρκεια των εποχών εσοδείας, γεγονός που τα καθιστά εξαιρετικά ευαίσθητα. Ο σχηματισμός υπερβολικής λάσπης και, επομένως, ισχυρών ροών αποβλήτων αποτελεί ανησυχία με τα CAS λόγω των νόμων για την περιβαλλοντική μεταρρύθμιση που επιβάλλουν αυστηρότερο έλεγχο της ποιότητας των WWW και απαγορεύουν τη διάθεση πλεονάζοντος (ανεπεξεργαστού) υλικού (Andreottola et al., 2009).

Όπως αναμενόταν, υπάρχει μεγάλη αύξηση του λειτουργικού κόστους για την επεξεργασία της λάσπης και την απονιτροποίηση και, κατά συνέπεια, του συνολικού λειτουργικού κόστους (operation and maintenance costs, OPEX) του CAS. Τα δυνητικά πλεονεκτήματα της χρήσης αυτού του συστήματος WWWT υψηλής απόδοσης και χαμηλής πολυπλοκότητας αντισταθμίζονται από τις σοβαρές αδυναμίες των συστημάτων CAS, οι οποίες περιλαμβάνουν ενεργειακή και κοστολογική αναποτελεσματικότητα, περιορισμένη ευελιξία και ανεπαρκή διαχείριση αποβλήτων (Dutta et al., 2018).

## 2.4 Αναερόβια χώνευση

Η αναερόβια βιοτεχνολογία παρουσιάζει αύξηση των εφαρμογών πλήρους κλίμακας, καθώς όλο και περισσότεροι άνθρωποι εκμεταλλεύονται τις δυνατότητές της για ανάκτηση πόρων, εξοικονόμηση κόστους και εξοικονόμηση ενέργειας. Με κάθε 20 τόνους COD που εξαλείφονται, η αναερόβια χώνευση (Anaerobic Digestion, AD) αποτελεί δημοφιλή επιλογή για διαδικασίες αναερόβιας επεξεργασίας και μπορούν να εξοικονομήσουν έως και 20 MWh ανά ημέρα. Οι εγκαταστάσεις επεξεργασίας μπορεί να είναι σε θέση να χρησιμοποιούν τους ανακτημένους ενεργειακούς πόρους για την αύξηση των εσωτερικών ενεργειακών απαιτήσεων χάρη στην εξοικονόμηση ενέργειας. Η AD περιλαμβάνει τη μεταβολική μεταφορά βιοχημικής ενέργειας από οργανικό υλικό σε μεθανογόνα συστατικά που υπάρχουν στην κλίνη λάσπης του χωνευτή και εν συνεχεία στο βιοαέριο που παράγεται στον χωνευτή. Μετά από πρόσθετη βελτίωση, το βιοαέριο που παράγεται κατά τη διάρκεια της AD μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως πολύτιμη πηγή ενέργειας που μπορεί να μειώσει το κόστος της επένδυσης σε WWWT στις αναπτυσσόμενες χώρες για δύο λόγους. Πρώτον, σε σύγκριση με την παραγωγή υγρών βιοκαυσίμων, η AD απαιτεί λιγότερη έκταση, νερό και θρεπτικά συστατικά για την παραγωγή βιοαερίου. Δεύτερον, οι εμπειρογνώμονες αναμένουν χαμηλότερες οικονομίες κλίμακας για την παραγωγή βιοαερίου με AD (Ioannou et al., 2015).

Είναι δυνατή η μετατροπή του βιοαερίου σε καθαρό βιοκαύσιμο, το οποίο έχει μεγαλύτερη ενεργειακή αξία για βιομηχανικές χρήσεις. Παραδείγματα αυτών των χρήσεων περιλαμβάνουν βιομηχανικούς στόλους που λειτουργούν από οινοποιεία, διαδικασίες σταθεροποίησης και διαύγασης οίνου και συστήματα WWWT. Προκειμένου να τεθεί σε προοπτική η δυνητική εξοικονόμηση ενέργειας, ένα κιλό COD που απομακρύνεται από ένα AD απαιτεί μια kWh παροχής ενέργειας, αλλά ένα κιλό COD μεθανίου από ένα AD μπορεί να παράγει περίπου τέσσερις kWh (υποθέτοντας ότι δεν υπάρχουν απώλειες ενέργειας κατά τη μετατροπή). Επιπλέον, τα οικονομικά και περιβαλλοντικά ζητήματα που σχετίζονται με το CAS αντιμετωπίζονται από το χαμηλό λειτουργικό κόστος της AD και την ελάχιστη συσσώρευση περίσσειας λάσπης στον χωνευτήρα (Andreottola et al., 2009). Επιπλέον, οι παράγοντες αυτοί ενθαρρύνουν την ανάκτηση ενός προσιτού χωνεμένου υπολείμματος ή βιολιπάσματος για την επαναχρησιμοποίηση σε κηπευτικά, μειώνοντας έτσι την ανάγκη για ανόργανα λιπάσματα (Khan et al., 2020).



Εικόνα 1: Αναερόβια χώνευση με χρήση βιοαντιδραστήρα αναερόβιας μεμβράνης πλευρικού ρεύματος (Khan et al., 2020)

## 2.5 Αναερόβιος αντιδραστήρας ανοδικής ροής διαμέσου στιβάδας λάσπης (Upflow Anaerobic Sludge Reactor - UASB)

Θεωρώντας τα επεξεργασμένα λύματα ως πολύτιμο πόρο, οι τομείς της αμπελοργαίας και της οινοποίησης στρέφονται προς την ανάκτηση των λυμάτων που είναι διαθέσιμα στα απόβλητα. Η σύνδεση μεταξύ της ζήτησης νερού και των απαιτήσεων διάθεσης αποβλήτων στους αμπελώνες θα μπορούσε να ενσωματωθεί με την ανακύκλωση επεξεργασμένων WWW σε κλειστό κύκλωμα, εάν οι τεχνολογίες UASB (Upflow Anaerobic Sludge Reactor) μπορούν να αποδώσουν επιτυχώς υψηλή ποιότητα προϊόντος. Επομένως, η δημιουργία εύρωστων βιοαντιδραστήρων UASB για χρήση σε WWW θα μπορούσε να οδηγήσει σε σημαντική εξοικονόμηση νερού κατά την οινοποίηση, καθώς και στην εφαρμογή τεχνικών ανάκτησης πόρων που μετατρέπουν τα συστήματα και τις εγκαταστάσεις WWWT σε τοπικούς αποδέκτες (Bolzonella et al., 2019).

Ο βιοαντιδραστήρας UASB παρέχει ταχύτερη επεξεργασία υγρών αποβλήτων από τα συστήματα AD και, επομένως από τα συστήματα CAS, σε μια σειρά κριτηρίων για βιωσιμότητα. Κατ' αρχάς, ο κάθετος σχεδιασμός του βιοαντιδραστήρα UASB είναι καταλληλότερος για υγρά οργανικά απόβλητα υψηλής αντοχής, όπως τα υγρά απόβλητα WWW, ενώ οι ADs χρησιμοποιούνται πιο αποτελεσματικά με στερεά οργανικά απόβλητα όπως τα στέμφυλα, οι φλούδες και τα κουκούτσια σταφυλιών ή το ενσίρωμα καλαμποκιού, η κοπριά βοοειδών και τα περιττώματα κοτόπουλου. Δεύτερον, ο βιοαντιδραστήρας UASB είναι προσαρμόσιμος, ενισχύοντας την εποχικότητα των WWW, και μπορεί να κατασκευαστεί μικρότερος (σε σύγκριση με τις ADs) λόγω των ελάχιστων απαιτήσεων σε γη, των ανοδικών ταχυτήτων των υγρών και της χαμηλής συσσώρευσης λάσπης στον

βιοαντιδραστήρα, τα οποία μειώνουν το αρχικό κόστος επένδυσης του WWWT (Dutta et al., 2018).

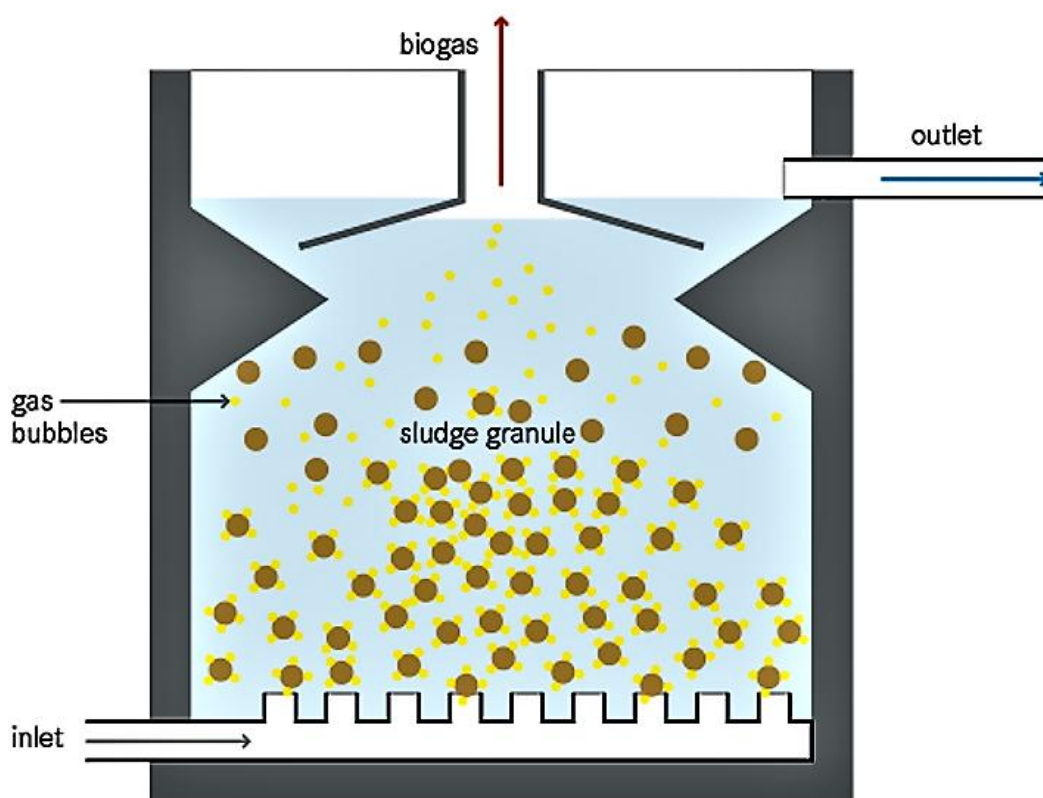
Η ικανότητα του βιοαντιδραστήρα να αποσυνδέει τον υδραυλικό χρόνο κατακράτησης (Hydraulic Retention Time, HRT) από τον χρόνο κατακράτησης στερεών (Solid Retention Time, SRT) καθίσταται δυνατή χάρη στην καλή καθιζησιμότητα της λάσπης (Almukhtar et al., 2018). Επιπλέον, ο βιοαντιδραστήρας μπορεί να προσαρμοστεί σε υψηλούς ρυθμούς οργανικού φορτίου (Organic Loading Rate, OLR), διατηρώντας παράλληλα αποτελεσματική απομάκρυνση COD και επιταχυνόμενες υδραυλικές ροές. Επειδή οι μεταβολές της θερμοκρασίας και του pH, καθώς και τα φορτία οργανικού φορτίου υψηλής αντοχής, δεν διαταράσσουν σημαντικά τις λειτουργίες επεξεργασίας λυμάτων, αυτή η τεχνική αναερόβιας επεξεργασίας είναι ιδιαίτερα προσαρμόσιμη για WWWT (Dutta et al., 2018). Μπορούν επίσης να λειτουργήσουν σε διάφορα θερμοκρασιακά εύρη, αλλά αυτό απαιτεί σταδιακές προσαρμογές του συστήματος σε απόκριση σε βηματικές αλλαγές της θερμοκρασίας, κάτι που δεν είναι ισοδύναμο με τις δυνατότητες του UASB. Η βιοτεχνολογία UASB παρουσιάζεται ως μια ολοκληρωμένη λύση για βιώσιμα WWWT. Τέλος, η περίσσεια βιοαερίου από τον βιοαντιδραστήρα μπορεί να επιτρέψει στα εργοστάσια/συστήματα WWWT να εξαρτώνται λιγότερο από τα δημοτικά δίκτυα για προμήθειες φυσικού αερίου και ηλεκτρικής ενέργειας, όπως έχει υποτεθεί για τα περισσότερα αναερόβια συστήματα (Bolzonella et al., 2019).

Η ιδέα της συγκομιδής βιοαερίου για κατανάλωση ενέργειας είναι ελκυστική, αλλά ένα κρίσιμο σημείο που δεν καλύπτεται με μεγάλη λεπτομέρεια στη βιβλιογραφία είναι ο τρόπος προετοιμασίας για βιομηχανικές εφαρμογές μεγάλης κλίμακας με βιοαντιδραστήρες UASB. Σε γενικές γραμμές, ο επαρκής σχεδιασμός εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων απαιτεί ακριβή δεδομένα μετρήσεων. Μια δεξαμενή απομόνωσης μπορεί να συμβάλει στη μείωση της επίδρασης που έχουν οι διακυμάνσεις στην ποιότητα των WWWT στον UASB. Επιπλέον, η συχνή δειγματοληψία και η επιγραμμική παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο μπορούν να συμβάλουν στη βελτίωση του ελέγχου της διαδικασίας επεξεργασίας. Ωστόσο, προτείνεται ότι η WWWT που χρησιμοποιεί βιοτεχνολογία UASB να ακολουθείται από αερόβια στίλβωση ή άλλο είδος δευτερογενούς επεξεργασίας λυμάτων. Οι λειτουργικές απαιτήσεις για βιοαντιδραστήρες που λειτουργούν σε υψηλές θερμοκρασίες και συνθήκες αιχμής, καθώς και η σχέση μεταξύ της HRT και της OLR σε έναν βιοαντιδραστήρα UASB, δεν είναι πλήρως κατανοητές προς το παρόν. Εξαιτίας



αυτού, ακόμη και με τη σαφή προσαρμοστικότητα αυτής της βιοτεχνολογίας, ο βιοαντιδραστήρας UASB χρειάζεται περίπλοκους χειρισμούς για τη βελτιστοποίηση της απομάκρυνσης COD και της παραγωγής βιοαερίου υπό μεγάλες διακυμάνσεις θερμοκρασίας και φόρτωσης (Kalyuzhnyi et al., 2000).

Οι αμπελουργικές περιοχές που βιώνουν κυρίως αρκτικές ή τροπικές εποχές θα πρέπει να προσέχουν ιδιαίτερα τη θερμοκρασία λειτουργίας, καθώς χρειάζονται αξιόπιστες πηγές ενέργειας για τη ρύθμιση της θερμοκρασίας σε κατάλληλες μεσόφιλες συνθήκες. Οι μόνοι χειριστές που είναι σε θέση να εποπτεύουν διαισθητικά και να ελέγχουν τη λειτουργία του βιοαντιδραστήρα UASB είναι εργαζόμενοι υψηλής εξειδίκευσης, γεγονός που αυξάνει την πολυπλοκότητα της διαχείρισης των συστημάτων. Παρόλο που υπάρχουν προφανή εμπόδια στην πλήρη ανάπτυξη της βιοτεχνολογίας UASB για την επεξεργασία των WWW, ο βιοαντιδραστήρας UASB είναι αξιοσημείωτος για τις δυνατότητες βιωσιμότητας, προσαρμοστικότητας και ενεργειακής αποδοτικότητας που προσφέρει, εκτός από τα πλεονεκτήματά του έναντι των CAS και AD.



Εικόνα 2: Αναερόβιος αντιδραστήρας ανοδικής ροής διαμέσου στιβάδας λάσπης (Bolzonella et al., 2019)

## Κεφάλαιο 3: Ποιοτικά και Ποσοτικά Χαρακτηριστικά και Μεθοδολογίες

### Διαχείρισης των αποβλήτων

Τα κοινά στοιχεία που υπάρχουν στα υγρά απόβλητα που παράγονται κατά την εμπορική οινοποίηση ποικίλλουν, όπως και τα μεγέθη των οινοποιείων που τα παράγουν. Η συγκομιδή, η σύνθλιψη, η ζύμωση, η διαβάθμιση και η διαύγαση, η ωρίμανση και η εμφιάλωση είναι τα πέντε διακριτά στάδια της διαδικασίας οινοποίησης. Τα μικρά οινοποιεία παράγουν το 80 % των υγρών αποβλήτων των οινοποιείων κατά τη διάρκεια του τρύγου, ενώ τα μεσαίου και μεγάλου μεγέθους οινοποιεία που παράγουν συνεχώς παράγουν περίπου το 50 % των υγρών αποβλήτων κατά τη διάρκεια του τρύγου (Howell et al., 2016).

Για τη δημιουργία ενός λίτρου κρασιού, τα οινοποιεία παράγουν συνήθως μεταξύ 0,2 και 4 λίτρων υγρών αποβλήτων (Welz et al., 2016). Το χαμηλό pH (μεταξύ 4 και 5) των υγρών αποβλήτων των οινοποιείων προκαλείται συνήθως από την παρουσία οργανικών οξέων, όπως το οξικό, το γαλακτικό, το τρυγικό, το κιτρικό και το μηλικό οξύ. Σύμφωνα με αναφορές, η ηλεκτρική αγωγιμότητα (Electric Conductivity, EC) των υγρών αποβλήτων από οινοποιεία κυμαίνεται από 1,62 έως 6,15 mS/cm (Mulidzi, 2021). Τα υγρά απόβλητα οινοποιείων περιέχουν θρεπτικά συστατικά με επίπεδα ολικού αζώτου και ολικού φωσφόρου που κυμαίνονται από 100 έως 640 mg/L και 240 έως 657 mg/L, αντίστοιχα (Melamane, Strong, et al., 2007; Bustamante et al., 2008). Τα υγρά απόβλητα οινοποιείων περιέχουν θρεπτικά συστατικά με επίπεδα ολικού αζώτου και ολικού φωσφόρου που κυμαίνονται από 100 έως 640 mg/L και 240 έως 657 mg/L, αντίστοιχα (Melamane, Strong, et al., 2007; Bustamante et al., 2008). Κατά την εκτίμηση της ποσότητας των οργανικών ρύπων στα υγρά απόβλητα, η χημική ζήτηση οξυγόνου, ή COD, είναι ένα κρίσιμο μέτρο. Σύμφωνα με τους Bolognesi et al. (2020), τα κύρια συστατικά του COD των υγρών αποβλήτων οινοποιείων περιλαμβάνουν εξαιρετικά διαλυτές αλκοόλες, σάκχαρα, πυρίμαχες ουσίες (όπως πολυφαινόλες), οξέα, τανίνες και λιγνίνη (Bolognesi et al., 2020). Σύμφωνα με δημοσιευμένα στοιχεία, η μέση περιεκτικότητα του COD στα υγρά απόβλητα οινοποιείων είναι 340 mg/L, με μέση συγκέντρωση 11 554 mg/L και μέγιστη συγκέντρωση 296 119 mg/L. Εκτεταμένες έρευνες σχετικά με τη σύνθεση των υγρών αποβλήτων οινοποιείου έχουν καθορίσει ότι η αιθανόλη και τα σάκχαρα (γλυκόζη και φρουκτόζη) αντιπροσωπεύουν το 90% του οργανικού φορτίου (Masi et al., 2015).

Αυτές οι προαναφερθείσες οργανικές και ανόργανες ενώσεις που βρίσκονται στα ανεπεξέργαστα απόβλητα οινοποιείων έχουν τη δυνατότητα να ευτροφίζουν (eutrophize) τους φυσικούς υδάτινους πόρους (όπως ποτάμια, λίμνες και φράγματα). Μπορούν επίσης

να προκαλέσουν αλατότητα του εδάφους και χημική ρύπανση όταν τα ανεπεξέργαστα λύματα διαχέονται μέσω της άρδευσης (Van Schoor, 2005). Οι Pedrero et al. (2010) αναφέρουν ότι η αποτελεσματικότητα της εγκατάστασης επεξεργασίας λυμάτων και η σύνθεση των χημικών ουσιών που εφαρμόζονται κατά τη διάρκεια των δραστηριοτήτων οινοποίησης καθορίζουν την ποιότητα των επεξεργασμένων λυμάτων των οινοποιείων εν γένει (Pedrero et al., 2010).

Σύμφωνα με τους Wellet et al. (2016), τα απόβλητα οινοποιείου μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες: i) στερεά απόβλητα, τα οποία περιλαμβάνουν σπόρους, οινολάσπη και άλλα υλικά που παράγονται κατά τη διαδικασία απολάσπωσης, συμπίεσης και καθίζησης και ii) υγρά απόβλητα, τα οποία περιλαμβάνουν το νερό πλύσης και έκπλυσης. Σύμφωνα με τους Christ και Burritt (2013), τα στερεά απόβλητα αποτελούνται από τη φλούδα, το στέλεχος, τον εναπομείναντα πολτό, τους σπόρους, τα στελέχη και τα κύτταρα ζύμης από τη διαδικασία ζύμωσης. Υπάρχουν δύο τύποι ρυπαντικών ουσιών που υπάρχουν στα απόβλητα των οινοποιείων: οργανικές και ανόργανες (Christ & Burritt, 2013).

Με λίγα λόγια, το κρασί αποτελείται από νερό, αλκοόλες, σάκχαρα, οξέα, φαινόλες, αζωτούχες ενώσεις, βιταμίνες και πτητικές ενώσεις. Κάθε ένα από αυτά τα συστατικά δίνει στο κρασί το ξεχωριστό άρωμα και τη γεύση του, τα οποία με τη σειρά τους επηρεάζουν το πόσο καλό θεωρείται ότι είναι. Τα άλατα καλίου ( $K^+$ ) και νατρίου ( $Na^+$ ) βρίσκονται σε αφθονία στα υγρά απόβλητα που παράγονται κατά τις διαδικασίες οινοποίησης, κυρίως επειδή το  $K^+$  εμφανίζεται στη φύση (Buelow et al., 2015). Όταν τα υγρά απόβλητα οινοποιείας πρόκειται να χρησιμοποιηθούν για την άρδευση των σταφυλιών, η συγκέντρωση των  $K^+$  και  $Na^+$  είναι ιδιαίτερα σημαντική, διότι τα ιόντα αυτά συμβάλλουν σημαντικά στη γονιμότητα του εδάφους (το  $K^+$  περισσότερο από το  $Na^+$ ), αλλά όταν υπάρχουν σε υπερβολική ποσότητα, είναι επιζήμια για την ανάπτυξη των φυτών. Η χρήση καυστικών χημικών καθαρισμού κατά τη διαδικασία οινοποίησης συνδέεται επίσης με την αφθονία αυτών των ιόντων. Συνήθως, οι στερεές εναποθέσεις τρυγικών και άλλων οργανικών οξέων που κατακάθονται στο εσωτερικό των δοχείων και του εξοπλισμού καθαρίζονται με τη χρήση διαλυμάτων αλκαλίων όπως το  $NaOH$  και το  $KOH$ . Στη συνέχεια εφαρμόζονται αραιωμένα κιτρικό ή τρυγικό οξύ ως όξινοι παράγοντες για την απομάκρυνση τυχόν εναπομείναντος καυστικού υλικού. Τελικά, τα χημικά καθαρισμού απομακρύνονται με τη χρήση καθαρού νερού (Charman et al., 2004).

Εκτός από τα οργανικά υπολείμματα, το άζωτο και ο φώσφορος είναι ιδιαίτερα προβληματικά, διότι, εάν διοχετευθούν στα υγρά απόβλητα, θα μπορούσαν να προκαλέσουν ευτροφισμό και θάνατο της υδρόβιας ζωής (Welz et al., 2016). Το κρασί, ο

χυμός σταφυλιών και οι οινολάσπες είναι πηγές οργανικών ρύπων όπως φαινόλες, αιθανόλη και σάκχαρα. Αυτά τα υλικά προσθέτουν επίσης στην αφθονία θρεπτικών ουσιών στα υγρά απόβλητα του οινοποιείου, όπως φωσφορικά άλατα και άζωτο. Οι άσχημες οσμές και η υπερβολική αφθονία θρεπτικών συστατικών στα υγρά απόβλητα είναι μεταξύ των αρνητικών συνεπειών τους στο περιβάλλον.

Τα οινοποιεία παράγουν μεγάλη ποσότητα υγρών αποβλήτων, η οποία οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στις διαδικασίες καθαρισμού. Οι επιπτώσεις των κύριων διαδικασιών οινοποίησης στην παραγωγή υγρών αποβλήτων από τα οινοποιεία, καθώς και των επιπτώσεών τους στην ποιότητα των υγρών αποβλήτων είναι πολλές. Το ίδιο ισχύει και για τις πιθανές περιβαλλοντικές επιπτώσεις που θα μπορούσαν να επηρεάσουν τα ρυθμιστικά πρότυπα ποιότητας των υγρών αποβλήτων (Van Schoor, 2005). Όπως έχει αποδειχθεί, τουλάχιστον ένας τύπος επεξεργασίας είναι απαραίτητος για την τήρηση των περιβαλλοντικών κριτηρίων, δεδομένης της συμβολής αυτών των δραστηριοτήτων στα υγρά απόβλητα των οινοποιείων.

### **3.1 Μεθοδολογίες Διαχείρισης Υγρών Αποβλήτων**

Σε μια προσπάθεια να μειωθούν τα προβλήματα που αντιμετωπίζουν οι αμπελώνες με τη διάθεση των λυμάτων τους, έχουν μελετηθεί διάφορες τεχνικές επεξεργασίας λυμάτων. Η επαναχρησιμοποίηση των υγρών αποβλήτων από τα οινοποιεία για την άρδευση της γης γίνεται μια συνήθης διαδικασία. Παρ' όλα αυτά, τα διαλυμένα ιόντα καλίου και νατρίου που βρίσκονται σε αυτά τα υγρά απόβλητα έχουν τη δυνατότητα να επηρεάσουν αρνητικά τη χημεία, τη φυσική σύσταση και την υδραυλική αγωγιμότητα (ένα μέτρο του πόσο εύκολα κινείται το νερό μέσα στο έδαφος). Το λιγότερο διαπερατό έδαφος υποδηλώνεται από χαμηλότερη υδραυλική αγωγιμότητα. Αν και έχει αποδειχθεί ότι η άρδευση με νερό πλούσιο σε κάλιο βελτιώνει γενικά τη γονιμότητα του εδάφους, η παρατεταμένη χρήση της τεχνικής μπορεί να μεταβάλει τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά του εδάφους (Charman et al., 2001). Οι υψηλές συγκεντρώσεις καλίου και αλατιού (800-1000 mg/L) στα υγρά απόβλητα των οινοποιείων προκαλούν διόγκωση και διασπορά, γεγονός που μειώνει τους ρυθμούς με τους οποίους το νερό και το οξυγόνο διεισδύουν στο έδαφος και προκαλεί κρούστα και σπασίματα. Επιπλέον, η παρατεταμένη χρήση υγρών αποβλήτων οινοποιείων για άρδευση προκαλεί ανεπαρκή αερισμό, ο οποίος με τη σειρά του προκαλεί έλλειψη οξυγόνου και περιορίζει την ανάπτυξη των ριζών των φυτών (Arvanitoyannis et al., 2006).

### 3.1.1 Προκαταρκτική επεξεργασία υγρών αποβλήτων οινόποιου

Η πλειονότητα των διεργασιών επεξεργασίας υγρών αποβλήτων περιλαμβάνει τουλάχιστον ένα στάδιο φυσικής επεξεργασίας, το οποίο χρησιμοποιείται κυρίως για την απομάκρυνση τυχόν στερεών υλικών από τα λύματα. Πρόκειται για μια εύκολη διαδικασία που λειτουργεί καλά και βοηθά να κρατηθούν στερεά όπως σπόροι, στελέχη και φύλλα εκτός του κύριου και δευτερεύοντος εξοπλισμού επεξεργασίας (Mosse et al., 2011). Για σωματίδια

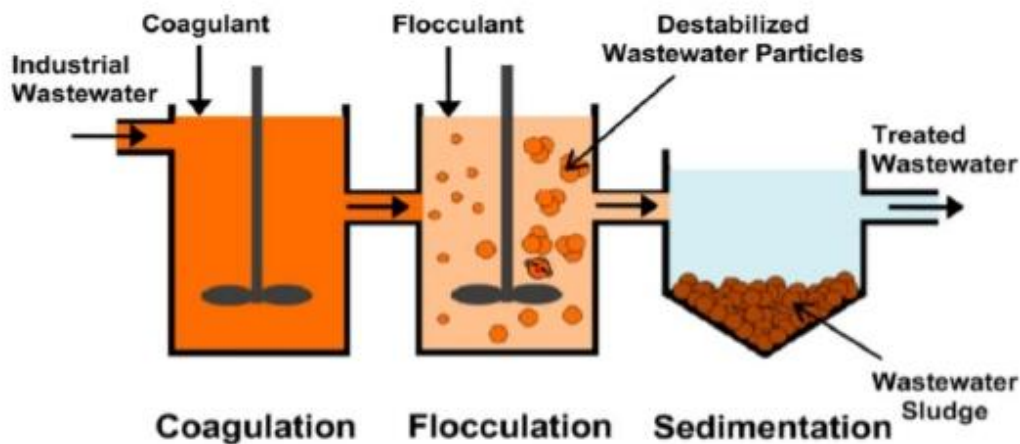


FIGURE 2

Εικόνα 3: Διαδικασία πήξης και κροκίδωσης για την επεξεργασία υγρών αποβλήτων (The et al., 2016)

μεγαλύτερα από 500  $\mu\text{m}$  (περίπου  $6,5 \text{ m}^3$ ), χρησιμοποιούνται κόσκινα σε αυτό το αρχικό στάδιο επεξεργασίας για την απομάκρυνση των μεγάλων υλικών (φλούδες, κουκούτσια, στελέχη και οινολάσπες), ενώ τα φίλτρα χρησιμοποιούνται για σωματίδια μεταξύ 100 και 500  $\mu\text{m}$  (Day, 2011).

### 3.1.2 Πρωτογενείς φυσικοχημικές μέθοδοι επεξεργασίας

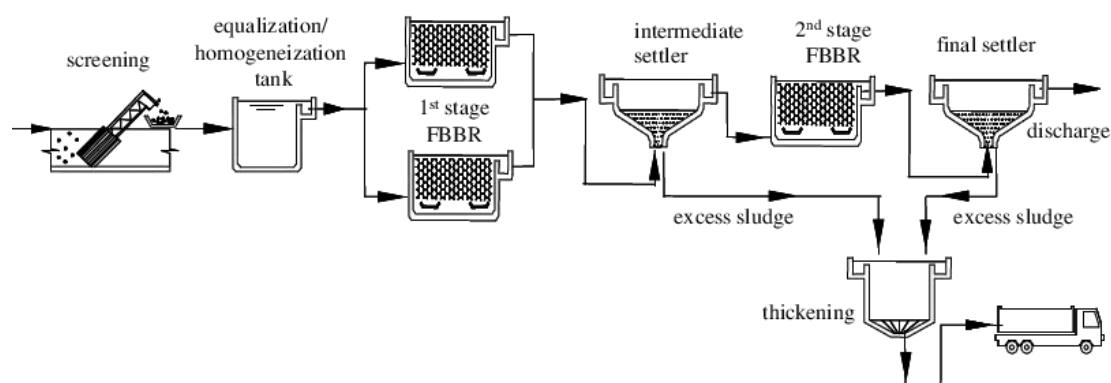
Χημικές ουσίες χρησιμοποιούνται για την τροποποίηση της φυσικής κατάστασης των κολλοειδών σωματιδίων, αλλάζοντας τη σταθερότητά τους και αυξάνοντας την πηκτικότητα τους για πρόσθετη επεξεργασία, σε φυσικοχημικές μεθόδους επεξεργασίας (συνδυασμός φυσικών και χημικών μεθόδων επεξεργασίας). Η ικανότητα βιοαποικοδόμησης των οργανικών υλικών στα υγρά απόβλητα οινόποιων μπορεί να επηρεαστεί σημαντικά από αυτή την τεχνική επεξεργασίας. Για μικροσκοπικά σωματίδια με μέγεθος σωματιδίων μικρότερο από 10  $\text{nm}$ , χρησιμοποιείται συχνά η κροκίδωση, μια τεχνική καθίζησης με χημική βοήθεια. Η πήξη/κροκίδωση, οι δεξαμενές καθίζησης, η φυγοκέντρηση και η μικροδιήθηση είναι μερικές από τις τεχνικές που χρησιμοποιούνται στη φυσικοχημική επεξεργασία για την εξαγωγή αιωρούμενων στερεών ή υπολειμμάτων από τα λύματα. Πριν από τη βιολογική επεξεργασία, η φυσικοχημική επεξεργασία χρησιμοποιείται συχνότερα ως

προεπεξεργασία για τη μείωση του οργανικού φορτίου και της θολότητας (αύξηση της διαύγειας) των υγρών αποβλήτων οινοποιείου (Chiriacò et al., 2019). Σύμφωνα με τους Kyzas et al. (2016), ορισμένα πλεονεκτήματα των μεθόδων φυσικοχημικής επεξεργασίας περιλαμβάνουν:

- (i) μείωση της συγκέντρωσης BOD (Biochemical Oxygen Demand) πριν από την απόρριψη ή την επαναχρησιμοποίηση,
- (ii) μείωση της συσσώρευσης λάσπης και της φθοράς των αντλιών επεξεργασίας και
- (iii) βελτίωση της αποτελεσματικότητας της επεξεργασίας μέσω της προσθήκης χημικών ουσιών (η ρύθμιση του pH, για παράδειγμα, μπορεί να αποκαταστήσει γρήγορα τα στερεά). Άλλες φυσικοχημικές τεχνικές επεξεργασίας, όπως η χημική καταβύθιση με χηλικούς παράγοντες, η καθίζηση και η κροκίδωση έχουν χρησιμοποιηθεί για την επεξεργασία υγρών αποβλήτων οινοποιείων (Kyzas et al., 2016).

### 3.1.3 Μέθοδοι βιολογικής επεξεργασίας

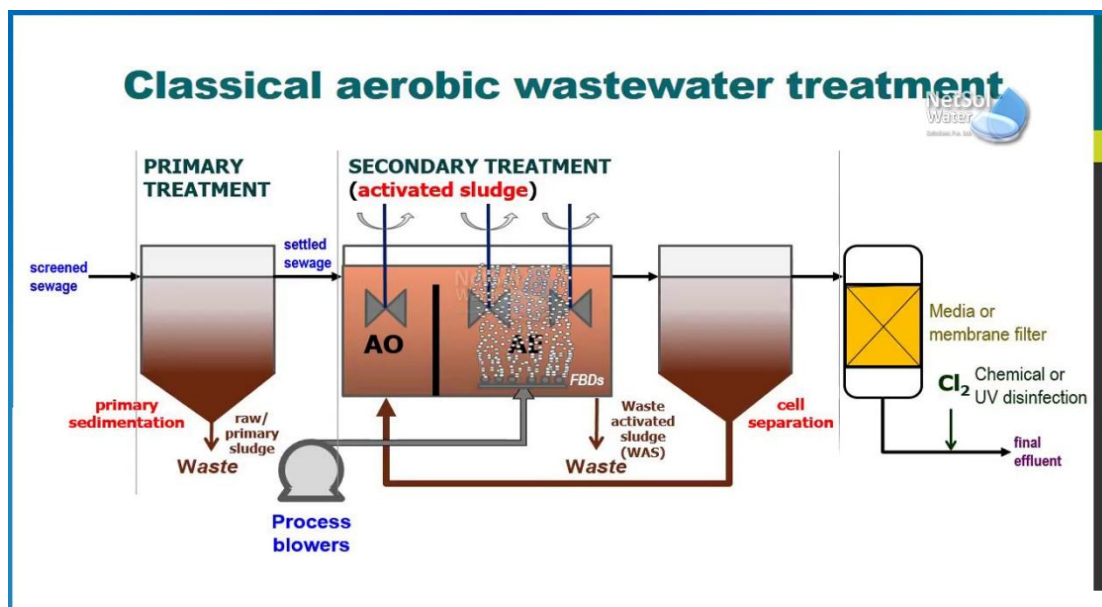
Οι πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες τεχνικές βιολογικής θεραπείας είναι τα αερόβια, τα αναερόβια και τα συνδυασμένα αναερόβια/αερόβια συστήματα, τα οποία συνήθως εφαρμόζονται κατά τη φάση της δευτεροβάθμιας επεξεργασίας. Οι τεχνικές αυτές συχνά κατηγοριοποιούνται ως περιβαλλοντικά φιλικές, δεδομένου ότι τα απόβλητα οινοποιείων περιέχουν εύκολα βιοαποικοδομήσιμα οργανικά υλικά. Η ανακυκλωμένη βιομάζα καθίζησης χρησιμοποιείται στις βιολογικές εγκαταστάσεις επεξεργασίας υγρών αποβλήτων οινοποιείων για την επιλογή ενός συνδυασμού μικροβιακών φλόκων και δημιουργούνται αντιδραστήρες υψηλής απόδοσης με την αύξηση της συγκέντρωσης της βιομάζας στο εσωτερικό των αντιδραστήρων (Eusebio et al., 2004). Η χρήση αερόβιων και αναερόβιων μεθόδων βιολογικής επεξεργασίας των υγρών αποβλήτων οινοποιείων θα καλυφθεί στις επόμενες ενότητες.



Εικόνα 4: Σχέδιο της εγκατάστασης πλήρους κλίμακας για την επεξεργασία υγρών αποβλήτων οινοποιείου (Eusebio et al., 2004)

### 3.1.4 Αερόβια επεξεργασία

Μία από τις πιο δημοφιλείς τεχνολογίες για τη συνολική επεξεργασία των υγρών αποβλήτων είναι το αερόβιο σύστημα, το οποίο αποτελείται από λιμνοδεξαμενές με μεγάλες αντλίες, όπου η κίνηση του αέρα προωθεί την ανάπτυξη των αερόβιων βακτηρίων που απαντούν φυσικά στα λύματα (Kyzas et al., 2016). Παρόλο που είναι γνωστό ότι συχνά παρατηρείται ρύπανση των υπόγειων υδάτων και δυσάρεστες οσμές, οι αερόβιες διεργασίες είναι συχνά επαρκείς για την ικανοποίηση των κανονιστικών απαιτήσεων απόρριψης (Bories et al., 2007). Οι αεριζόμενες λίμνες είναι η πιο απλή, δημοφιλής και προσιτή μέθοδος επεξεργασίας υγρών αποβλήτων στο χώρο του ξενοδοχείου για την πλειονότητα των εμπορικών οιοποιείων (Storm, 2001). Τα οιοποιεία που λειτουργούν όλο το χρόνο μπορεί να ανησυχούν, επειδή τα συστήματα αυτά έχει αποδειχθεί ότι έχουν χαμηλότερα ποσοστά βιολογικής δραστηριότητας σε ψυχρότερες καιρικές συνθήκες



Εικόνα 5: Τυπική αερόβια επεξεργασία υγρών αποβλήτων (Alisawi, 2020).

(Alisawi, 2020).

### 3.1.5 Αναερόβια επεξεργασία

Επειδή τα λύματα των οιοποιείων έχουν σημαντική περιεκτικότητα σε οργανικά συστατικά, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, είναι λογικό να σκεφτούμε τον συνδυασμό της επεξεργασίας λυμάτων με διεργασίες αναερόβιας χώνευσης για την παραγωγή ενέργειας. Χωρίς οξυγόνο, η αναερόβια χώνευση λαμβάνει χώρα και βασίζεται σε διαφορετικές μεταβολικές οδούς που χρησιμοποιούνται από μια ποικιλία διαφορετικών μικροβίων (Mosse et al., 2012). Το βιοαέριο είναι το κύριο υποπροϊόν αυτής της τεχνολογίας

επεξεργασίας, η οποία βασίζεται στην κατανάλωση διαλυμένης οργανικής ύλης από μια κοινότητα αναερόβιων μικροοργανισμών στα υγρά απόβλητα των οινοποιείων (Basset et al., 2016). Συνεπώς, η δυνατότητα παραγωγής ενέργειας (υπό μορφή βιοαερίου) και η χρήση της για τη διατήρηση των απαιτήσεων της λειτουργικής διαδικασίας αποτελεί βασικό πλεονέκτημα των συστημάτων αναερόβιας επεξεργασίας.

Οι Wolmarans & de Villiers (2002) διερεύνησαν την επεξεργασία των υγρών αποβλήτων αποσταγματοποιίας με τη χρήση UASB ως προεπεξεργασία και παρακολούθησαν την αποτελεσματικότητά της για μια τριετία (1998-2000). Με μέσο όρο εισροής 26 669 mg/L και επεξεργασμένου αποβλήτου 2 814 mg/L, το σύστημα αυτό πέτυχε υψηλή μείωση του COD άνω του 90%. Οι ογκομετρικοί ρυθμοί φόρτισης 4000 και 18000 mg/L ανά ημέρα εφαρμόστηκαν καθ' όλη τη διάρκεια των τριών εβδομάδων που παρακολουθήθηκε στενά η διαδικασία εκκίνησης του συστήματος UASB. Οι ογκομετρικοί ρυθμοί φόρτισης ορίζονται ως τα χιλιόγραμμα COD που δίνονται στον αντιδραστήρα ανά κυβικό μέτρο συνολικού όγκου του αντιδραστήρα ανά ημέρα (Wolmarans & De Villiers, 2002).

Συνήθως, η μέθοδος αυτή απαιτεί μια προκαταρκτική διαδικασία εγκατάστασης που μπορεί να διαρκέσει από μία εβδομάδα έως δύο μήνες. Προτού επιτευχθεί η σταθερότητα της διαδικασίας για τη λειτουργία της το 1998 και το 1999, το UASB των συγγραφέων χρειάστηκε επτά έως οκτώ ημέρες για την έναρξη λειτουργίας. Η μέση θερμοκρασία του αντιδραστήρα ήταν 35°C και το pH του ήταν 5,8. Μεταξύ του 1998 και του 1999, η απομάκρυνση του COD διατηρήθηκε στο 90% περίπου. Από την άλλη πλευρά, χρειάστηκαν 25 ημέρες για τη διαδικασία εκκίνησης κατά τη διάρκεια της περιόδου 2000 για να επιτευχθούν συγκρίσιμες συνθήκες και απόδοση απομάκρυνσης του COD. Από 60 έως πάνω από 90% αποτελεσματικότητα απομάκρυνσης του COD επιτεύχθηκε την πρώτη εβδομάδα της περιόδου 2000. Όταν όμως οι συγγραφείς αύξησαν το ρυθμό φόρτισης από 6.000 mg/L σε 12.000 mg/L ανά ημέρα (από >90% σε 65%), παρατηρήθηκε σημαντική μείωση. Μετά από αυτό, για τις επόμενες 19 ημέρες, οι συγγραφείς μείωσαν το ρυθμό φόρτισης σε λιγότερο από 8.000 mg/L ανά ημέρα μέχρι να επιτευχθεί σταθεροποίηση. Στη συνέχεια, ο ρυθμός φόρτωσης αυξήθηκε απότομα σε 18.000 mg/L ημερησίως, χωρίς να προκληθεί σημαντική μείωση της απόδοσης απομάκρυνσης του COD (>90%). Μπορεί να παρατηρηθεί απώλεια της σταθερότητας των κόκκων με την αλλαγή των φορτίων COD, που τελικά οδηγεί σε πτώση της απόδοσης του αντιδραστήρα UASB. Αυτό παρατηρήθηκε κατά τη διάρκεια της ταχείας μείωσης και αύξησης του φορτίου COD για την περίοδο 2000.



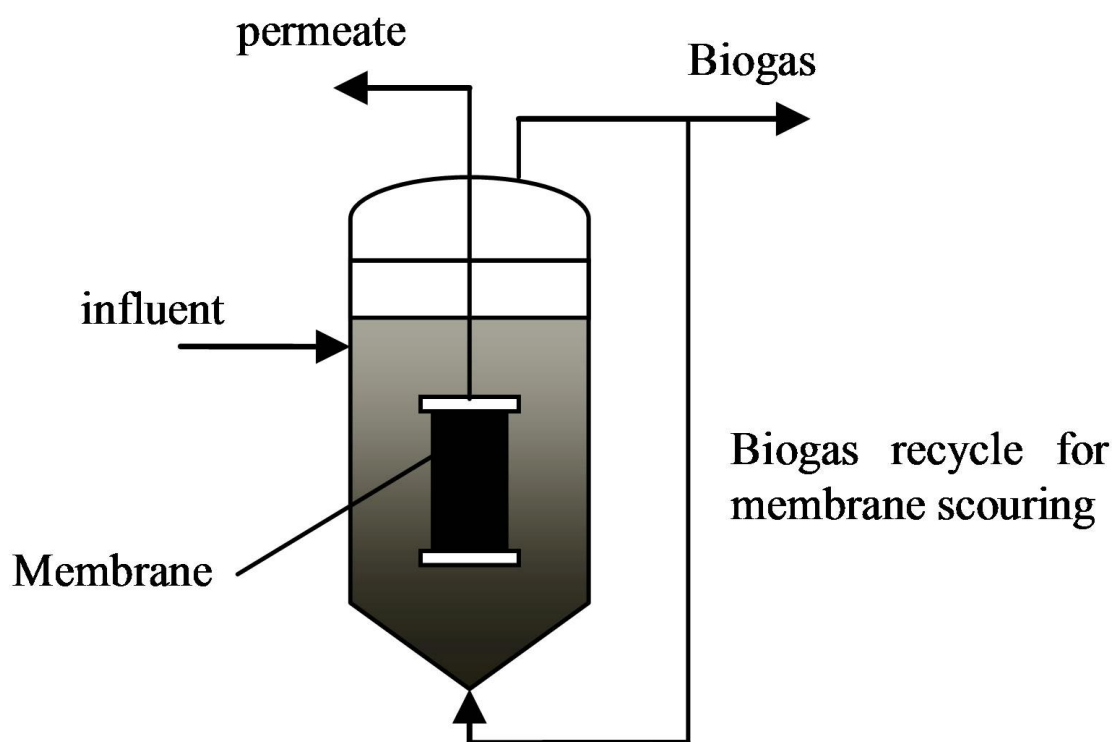
Οι Ganesh et al. (2010) εξέτασαν τη χρήση τριών αναερόβιων αντιδραστήρων σταθερής κλίνης για την επεξεργασία υγρών αποβλήτων αμπελώνων. Στην έρευνά τους χρησιμοποιήθηκαν ως μέσα ακινητοποίησης και συγκράτησης της βιομάζας τρεις μικροσκοπικοί πλωτοί φορείς πολυαιθυλενίου -που ονομάστηκαν S9, S30 και S40- με ρυθμούς οργανικής φόρτισης 42.000, 27.000 και 22.000 mg/L ανά ημέρα, αντίστοιχα. Το 80 % του COD απομακρύνθηκε με αυτή τη διάταξη (18 000 έως 21 000 mg/L τιμή COD εισροής). Οι συγγραφείς σημείωσαν ότι για την κυτταρική ανάπτυξη κατά τη βιολογική φάση, απαιτούνται περισσότερα θρεπτικά συστατικά (άζωτο και φώσφορος) για να διατηρηθεί η αναλογία C:N:P 400:7:1. Η μείωση του COD κατά 80% υπογραμμίζει ότι αυτή η διαδικασία βιολογικής επεξεργασίας απαιτεί λιγότερο χώρο στο έδαφος, λιγότερη ενέργεια και μικρότερο όγκο αντιδραστήρα σε σύγκριση με τις παραδοσιακές τεχνικές ενεργού λάσπης. Το μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι για να καταστεί η τελική εκροή κατάλληλη για διάθεση, είναι απαραίτητη η αερόβια επεξεργασία - ή μια μετα-επεξεργασία (Ganesh et al., 2010).

Ο Laing (2016) εξέτασε κατά πόσον η επεξεργασία των συνθετικών υγρών αποβλήτων οινοποιείου στη Νότια Αφρική μπορεί να επιτευχθεί με έναν αναερόβιο αντιδραστήρα διαδοχικής δέσμης (Anaerobic Sequencing Batch Reactor, AnSBR). Χρησιμοποιώντας αντιδραστήρες εργαστηριακής κλίμακας (14,7 L, με κοκκώδη μεσόφιλη βιομάζα που διατηρείται στους 35°C), οι παράμετροι επεξεργασίας για δύο τύπων συνθετικών λυμάτων (1 000 έως 4 000 mg/L και 4 000 έως 7 000 mg/L COD, αντίστοιχα) βελτιώθηκαν στην παρούσα μελέτη. Με ελεγχόμενες τιμές pH 7,2 και στις δύο φάσεις, επιτεύχθηκε μέση μείωση του COD κατά 88% κατά την πρώτη φάση της μελέτης (COD 1 000 έως 4 000 mg/L) και 80% κατά τη δεύτερη φάση (4 000 έως 7 000 mg/L). Το pH, η διάρκεια τροφοδοσίας και η συχνότητα ανάμιξης είναι μερικές από τις βέλτιστες παραμέτρους που εξετάστηκαν. Σε αντίθεση με τη συνήθη παραγωγή βιοαερίου, η οποία αποτελείται από 70% μεθάνιο και 30% διοξείδιο του άνθρακα, το σύστημα του συγγραφέα παρήγαγε βιοαέριο με το συστατικό του μεθανίου να αποτελεί περισσότερο από το 80% του βιοαερίου (απουσία αζώτου). Αυξάνοντας την αναλογία COD:N στον αντιδραστήρα, οι συγγραφείς ισχυρίζονται ότι τελικά παρήχθη ένα «αναβαθμισμένο βιοαέριο». Σε αυτό το στάδιο, παρατηρήθηκε μειωμένη διάτμηση των κόκκων και βελτιωμένη προστασία του μεθανογόνου δυναμικού (methanogenic potential), όταν τροποποιήθηκε ο χρόνος ανάμιξης του αντιδραστήρα. Ο συγγραφέας πρότεινε την αναβάθμιση αυτού του αντιδραστήρα σε μια εγκατάσταση πιλοτικής κλίμακας προκειμένου να αξιολογηθεί η βιωσιμότητα και η

οικονομία της διαδικασίας AnSBR σε μεγαλύτερη κλίμακα, υπό το πρίσμα αυτών των αποτελεσμάτων (Laing, 2016).

Βιοαντιδραστήρες αναερόβιων μεμβρανών (AnMBR): (2016) εξέταση τη βιωσιμότητά τους. Στην έρευνά τους, ο ειδικός ρυθμός οργανικής φόρτωσης διατηρήθηκε κάτω από τη μεθανογενετική δραστηριότητα (300 mg/L ανά μικτά υγρά αιωρούμενα στερεά (MLSS) ανά ημέρα) και τα υγρά απόβλητα παρουσίασαν κλάσμα διαλυτού COD 4040 mg/L και συνολικό COD 6752 mg/L. Στην έρευνά τους, ο AnMBR παρήγαγε 87,1% μεθάνιο, ενώ μείωσε το COD κατά 96,7%. Ωστόσο, η ρύπανση της μεμβράνης ήταν ένας περιοριστικός παράγοντας που μείωσε τη ροή της μεμβράνης κατά 80%, ιδιαίτερα στο εσωτερικό των πόρων της. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η ρύπανση στις μεμβράνες είναι ένας σημαντικός περιοριστικός παράγοντας, καθώς επηρεάζει την αποτελεσματικότητα και την ποιότητα της επεξεργασίας, καθώς και απαιτεί περισσότερη ενέργεια για τη λειτουργία σε συνθήκες ρύπανσης.

Όταν τα λύματα οينوποιείου υποβάλλονται σε αναερόβια επεξεργασία, η μείωση του COD κυμαίνεται συνήθως από 80 έως 98% και για κάθε κιλό COD που απομακρύνεται παράγονται 500-600 λίτρα βιοαερίου, εκ των οποίων το 60-80% είναι μεθάνιο (Moletta, 2005). Παρόλο που το βιοαέριο που παράγεται με αναερόβια επεξεργασία έχει λιγότερη λάσπη και είναι συνήθως άοσμο, η συνοχή και η αποτελεσματικότητά του στη μείωση του COD και του BOD δεν επαρκούν για να τοποθετηθεί σε υδάτινα σώματα χωρίς να περάσει πρώτα από μετα-αερόβια επεξεργασία (Bharathiraja et al., 2020).



Εικόνα 6: Βιοαντιδραστήρας αναερόβιων μεμβρανών (Chang et al., 2014)

### 3.1.6 Τεχνητοί υδροβιότοποι

Σύμφωνα με τους Welz et al. (2016), ένας τεχνητός υδροβιότοπος είναι μια τεχνητή ρηχή λεκάνη που γεμίζει με υπόστρωμα (χώμα ή χαλίκι) και φυτεύεται με βλάστηση που είναι εξαιρετικά ανεκτική σε κορεσμένες συνθήκες. Ο σκοπός της φύτευσης είναι να αναπαραχθεί η βιοαπορροφητική διαδικασία που λαμβάνει χώρα στους φυσικούς υδροτόπους. Εκτός από τον μεταβολισμό των διαθέσιμων θρεπτικών συστατικών, τα φυτά στους τεχνητούς υδροβιότοπους έχουν τη δυνατότητα να συλλέγουν βαρέα μέταλλα και να διασπών ορισμένους οργανικούς ρύπους (Welz et al., 2016). Οι τεχνητοί υδροβιότοποι αποτελούν μια προσιτή, περιβαλλοντικά φιλική και οπτικά ευχάριστη επιλογή για τον καθαρισμό των υγρών αποβλήτων, όταν υπάρχει επαρκής έκταση (Masi et al., 2015). Η προσρόφηση και η ιοντοεναλλαγή στις επιφάνειες των φυτών και των υποστρωμάτων, η καθίζηση των σωματιδίων, η διήθηση και η χημική καταβύθιση μέσω της επαφής μεταξύ νερού και του υποστρώματος (έδαφος), καθώς και η διάσπαση και ο μετασχηματισμός των ρύπων από μικροοργανισμούς και η πρόσληψη από τα φυτά είναι οι μηχανισμοί που εμπλέκονται στους τεχνητούς υδροβιότοπους για την επεξεργασία υγρών αποβλήτων. Οι τεχνητοί υδροβιότοποι κατατάσσονται ουσιαστικά ως συνδυασμός πρωτοβάθμιων, δευτεροβάθμιων και τριτοβάθμιων τεχνικών επεξεργασίας, ενώ μπορεί να εμπίπτουν και στη δευτεροβάθμια ή τριτοβάθμια επεξεργασία. Μια βασική αιτιολόγηση για τη δημιουργία και τη διάταξη τεχνητών υδροτόπων είναι η πιθανότητα τα λύματα από τα οινοποιεία να είναι φυτοτοξικά για ορισμένους τύπους υδροτοπικών φυτών. Μια εγκατάσταση τεχνητού υδροβιότοπου θα πρέπει ιδανικά να είναι σε θέση να αντέχει υψηλά επίπεδα οργανικού φορτίου και να αποβάλλει σημαντικές ποσότητες ρύπων, γεγονός που θα επιτρέψει τον καθαρισμό των λυμάτων σε σχετικά σύντομο χρονικό διάστημα (Arienzo et al., 2009).

Σε ένα μεσαίου μεγέθους οινοποιείο που παράγει 18.200 m<sup>3</sup> κρασιού ετησίως, οι Shepherd et al. (2001) έδειξαν πώς να χρησιμοποιήσουν πιλοτικής κλίμακας κατασκευασμένο υδροβιότοπο οριζόντιας υπόγειας ροής (Horizontal Flow, HF) (μήκος 6,1 m x πλάτος 2,4 m x βάθος 1,2 m), με ροές που κυμαίνονταν από 80 έως 170 m<sup>3</sup>/ημέρα με οργανικά φορτία COD από 500 έως 45 000 mg/L. Η επιφάνεια του συστήματος των 14,9 m<sup>2</sup> γέμισε με χαλίκι μεγέθους μπιζελιού με υδραυλική αγωγιμότητα 2 mm/s και σχεδιάστηκε για να συγκρατεί τα λύματα από ένα φίλτρο χονδρόκοκκης άμμου ανοδικής ροής που χρησιμοποιήθηκε ως προεπεξεργασία για 10 ημέρες. Ένα αραιωμένο απόβλητο με αρχική συγκέντρωση COD 993 mg/L τροφοδοτήθηκε στο CW με ρυθμό 500 L/ημέρα. Στο CW φυτεύτηκαν *Typha dominicus*, *Schoenoplectus acutus* (που αρχικά αναφερόταν ως *Scirpus*

*acutus*, αλλά η ονομασία του γένους άλλαξε έκτοτε) και κάποια *Sagittaria latifolia*. Οι Shepherd et al. (2001) ανέφεραν ότι το πείραμά τους απέδωσε απόδοση μείωσης τουλάχιστον 97% για το COD με συγκέντρωση εισροής μικρότερη από 5.000 mg/L και απόδοση απομάκρυνσης 97% για τα ολικά διαλυτά στερεά (Total Soluble Solids, TSS) με τιμές εισροής 450 mg/L (Shepherd et al., 2001).

Κατά την εφαρμογή σε υγρά απόβλητα οινοποιείου, οι Grismer et al. (2003) διερεύνησαν την επίδραση του χρόνου κατακράτησης και την απόδοση επεξεργασίας μιας μεθόδου τεχνητού υγροβιότοπου πλήρους κλίμακας. Συλλέχθηκαν δεδομένα από δύο υπόγειους υγροβιότοπους πλήρους κλίμακας από έναν αμπελώνα μεσαίου μεγέθους κοντά στο Horland της Καλιφόρνια και από ένα μικρότερο οινοποιείο κοντά στο Glen Ellen της Καλιφόρνια, καθ' όλη τη διάρκεια της περιόδου της αξιολόγησης του εαρινού τρύγου. Ο υγροβιότοπος του Horland παρουσίασε μειώσεις στο COD από 49 έως 79% και ποσοστά απομάκρυνσης των τανινών από 46 έως 76%. Σημειώνεται ότι κατά αυτή τη περίοδο, η απομάκρυνση της ρύπανσης ήταν πιο αποτελεσματική. Η επεξεργασμένη εκροή στο οινοποιείο Glen Ellen είχε συγκεντρώσεις COD μόλις 5 mg/L, ενώ η εισροή είχε συγκεντρώσεις COD 8.000 mg/L. Οι συγγραφείς ανέφεραν σημαντική μείωση του COD σε αυτό το οινοποιείο (Grismer et al., 2003).

Η επεξεργασμένη εκροή παρουσίασε τιμές COD 500 mg/L και οι Mulidzi et al. (2007) πέτυχαν μέση μείωση του COD κατά 80% (μέσος όρος εισροής 14.000 mg/L). Οι συγγραφείς χρησιμοποίησαν 4 m<sup>3</sup> λυμάτων από ένα οινοποιείο. Ο τεχνητός υγροβιότοπος που χρησιμοποιήθηκε για τη μελέτη είχε τις ακόλουθες διαστάσεις: μήκος 45 m, πλάτος 4 m και βάθος 1,2 m και ήταν γεμάτος με διατομικό χαλίκι με μέγεθος σωματιδίων που κυμαίνονταν από 20 έως 30 mm σε βάθος 0,9 m. Με συνολικό όγκο υγροβιότοπου 162 m<sup>3</sup> και όγκο πόρων 56,7 m<sup>3</sup> (προσβάσιμο στις ρίζες και τα λύματα), το χαλικόστρωμα παρουσίασε πορώδες 35%. Χρησιμοποιώντας λύματα αμπελώνων από το Goudini της Νότιας Αφρικής, η τεχνολογία αυτή μείωσε τα επίπεδα COD κατά 83% το χειμώνα και 80% το καλοκαίρι στην ίδια δοκιμή που διεξήχθη το 2004-2005. Μετά την κατασκευή, η εφαρμογή της επεξεργασίας σε υγροβιότοπο μεταξύ 2005 και 2006 είχε ως αποτέλεσμα τη μείωση του COD κατά μέσο όρο 82% (Mulidzi, 2007).

Σε μια πιο πρόσφατη μελέτη, οι Milani et al. (2020) διερεύνησαν και αξιολόγησαν την καταλληλότητα ενός κατασκευασμένου υγροβιότοπου πολλαπλών σταδίων που χρησιμοποιείται για την επαναχρησιμοποίηση αμπελοοινικών λυμάτων για άρδευση. Στο οινοποιείο Marabino στη Σικελία της Ιταλίας, ένα σύστημα πολλαπλών σταδίων που περιλάμβανε μια κάθετη κλίση υπόγειας ροής (Vertical Flow, VF), μια HF και μια μονάδα

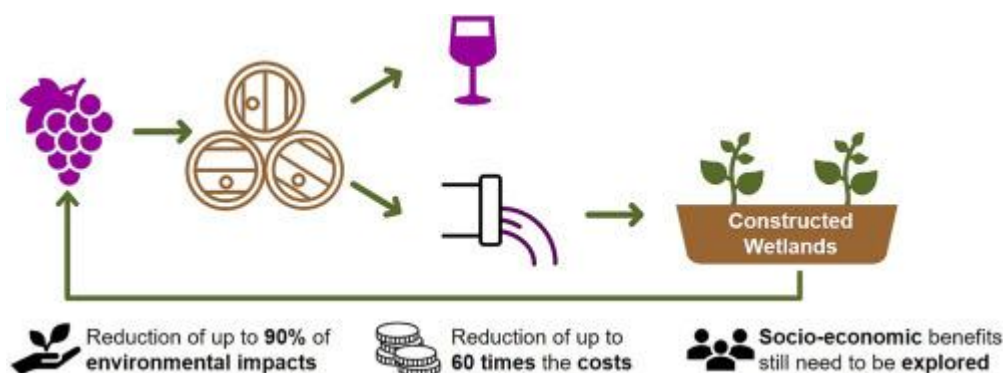
ελεύθερης υπόγειας ροής (Free Space Flow, FSF) χρησιμοποιήθηκε για την επεξεργασία 3 m<sup>3</sup> υγρών αποβλήτων ανά ημέρα. Το αποτέλεσμα ήταν η μείωση κατά 81 και 69% του COD και των TSS, αντίστοιχα. Τα λύματα που παράγονται από τις εγκαταστάσεις πλύσης που χρησιμοποιούνται σε όλο το οινοποιείο συνδυάστηκαν με τα λύματα που χρησιμοποιήθηκαν στη μελέτη. Ο υγροβιότοπος που δημιουργήθηκε και μια δεξαμενή εξισορρόπησης 5 m<sup>3</sup> ήρθαν μετά τη διαλογή των λυμάτων (Milani, 2021). Με αυτό το σύστημα, το 96% των δειγμάτων ικανοποιούσε το επιτρεπόμενο όριο άρδευσης COD στην Ιταλία μετά τον υγροβιότοπο οριζόντιας υπόγειας ροής. Η συμμόρφωση αυτή αυξήθηκε περαιτέρω στο 100% μετά την τελική μονάδα ελεύθερης υπόγειας ροής (2020 mg/L εισροής με ελάχιστο όριο 3 mg/L μετά την πολυβάθμια επεξεργασία). Επιπλέον, μετά την επεξεργασία, μόνο το 34% των δειγμάτων υπερέβη το όριο TSS (10 mg/L) και το 18% το όριο BOD (20 mg/L).

Προτείνουμε ότι, σε αντίθεση με τους Milani et al. (2020), τα συστήματα τεχνητών υγροτόπων είναι πιο κατάλληλα για μεσαίου και μεγάλου μεγέθους οινοποιεία. Αυτό συμβαίνει κυρίως λόγω του χώρου που απαιτείται για τους δημιουργημένους υγροβιότοπους. Για τη σωστή διάθεση των λυμάτων τους, τα μικρά οινοποιεία χρησιμοποιούν συνήθως μικρή επεξεργασία (πρωτοβάθμια και προκαταρκτική) και αναμειγνύουν τα λύματά τους με λύματα πριν από την επεξεργασία τους στις τοπικές πόλεις.

Στην ουσία, οι τεχνητοί υγροβιότοποι είναι συστήματα επεξεργασίας χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας και απλούστερης επεξεργασίας. Σε σύγκριση με πολλές άλλες διεργασίες επεξεργασίας υγρών αποβλήτων αμπελώνων (π.χ. ενεργής λάσπη και τεχνολογία μεμβρανών), μπορούν να προσφέρουν στα οινοποιεία αισθητικά οφέλη, απλό σχεδιασμό, κατασκευή και συντήρηση και φθινό λειτουργικό κόστος. Παρόλο που οι τεχνητοί υγροβιότοποι έχουν τα προαναφερθέντα οφέλη, τα μικρά οινοποιεία δεν θα ήταν κατάλληλα για αυτή την τεχνική, επειδή απαιτεί μεγάλη έκταση. Επιπλέον, η απομάκρυνση των αιωρούμενων σωματιδίων είναι απαραίτητη για τη λειτουργικότητα του συστήματος υγροβιότοπου και απαιτείται ένα στάδιο προεπεξεργασίας για να αποφευχθεί η απόφραξη του συστήματος. Οι επιλογές τριτοβάθμιας επεξεργασίας περιλαμβάνουν εξελιγμένες διεργασίες οξείδωσης.

Συμπερασματικά, οι πιο αποτελεσματικές τεχνολογίες επεξεργασίας για τα μικρά οινοποιεία είναι η χημική επεξεργασία (φυσικοχημική) σε συνδυασμό με αεριζόμενες λιμνοδεξαμενές, οι οποίες είναι κατάλληλες είτε για χερσαία εφαρμογή είτε για αστική συν-χρησιμοποίηση.

Από την άλλη πλευρά, η ενεργή λάσπη, οι τεχνητοί υγροβιότοποι και η αναερόβια χώνευση είναι κατάλληλες για οινοποιεία μεσαίας και μεγάλης κλίμακας λόγω της ικανότητάς τους να δεσμεύουν βιοαέριο και να το χρησιμοποιούν για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών των βιολογικών εγκαταστάσεων. Αν και η ποιότητα των επεξεργασμένων λυμάτων από τα οινοποιεία μπορεί να βελτιωθεί με τη χρήση προηγμένων διαδικασιών οξείδωσης, η τεχνική αυτή δεν έχει ακόμη εφαρμοστεί στην οινοβιομηχανία της Νότιας Αφρικής. Κατά συνέπεια, η μελλοντική έρευνα θα πρέπει να επικεντρωθεί στον τρόπο με τον οποίο θα μεταφερθεί αυτή η τεχνολογία σε αυτό το έθνος. Τέτοιες έρευνες θα πρέπει να εξετάσουν τη δυνατότητα εξομάλυνσης του κόστους, η οποία θα μπορούσε επομένως να χρησιμεύσει ως δικαιολογία για την επιλογή της προηγμένης οξείδωσης ως επιλογή επεξεργασίας αντί των μεθόδων που χρησιμοποιούνται σήμερα και περιλαμβάνονται στην παρούσα ανασκόπηση. Η παρούσα μελέτη περιορίζεται σε αποτελέσματα που έχουν δημοσιευθεί. Για τις έρευνες που καλύπτει η παρούσα μελέτη, βασικά χαρακτηριστικά όπως το κόστος κεφαλαίου του συστήματος, το κόστος λειτουργίας και οι υδροδυναμικές συνθήκες (όπως οι χρόνοι κατακράτησης) δεν είναι συχνά διαθέσιμα, γεγονός που καθιστά δύσκολη μια δίκαιη σύγκριση. Οι αμπελουργικές επιχειρήσεις θα πρέπει να είναι σε θέση να συγκρίνουν τι έχει γίνει, τι γίνεται τώρα και τι επιφυλάσσει το μέλλον για την επεξεργασία των υγρών αποβλήτων των αμπελώνων με τη βοήθεια της βιβλιογραφίας που παραθέτει και συζητά η παρούσα μελέτη.



Εικόνα 7: Τεχνητοί Υδροβιότοποι και οφέλη τους (Milani, 2021)

### 3.2 Θεσμοί που συμμετέχουν σε επιθεωρήσεις οινοποιείων

Στα ευρωπαϊκά οινοποιεία, διάφορα θεσμικά όργανα συμμετέχουν σε επιθεωρήσεις που σχετίζονται τόσο με την οινοποίηση όσο και με την περιβαλλοντική συμμόρφωση. Οι έλεγχοι διασφαλίζουν τη συμμόρφωση με την ευρωπαϊκή νομοθεσία, ιδίως όσον αφορά τη διαχείριση των αποβλήτων και την προστασία του περιβάλλοντος.

Σε ευρωπαϊκό επίπεδο, οι έλεγχοι στα οινοποιεία καθοδηγούνται κυρίως από κανονισμούς όπως ο κανονισμός (ΕΚ) αριθ. 479/2008, ο οποίος διέπει την επισήμανση των οίνων, την παραγωγή και τις σχετικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Οι επιθεωρήσεις διενεργούνται από τις εθνικές περιβαλλοντικές υπηρεσίες (π.χ. ARPA στην Ιταλία) και τις υγειονομικές αρχές. Οι οργανισμοί αυτοί παρακολουθούν όχι μόνο την ποιότητα των προϊόντων αλλά και τη συμμόρφωση με τα περιβαλλοντικά πρότυπα, συμπεριλαμβανομένης της διαχείρισης των αποβλήτων, όπως η λάσπη και τα λύματα (Collivignarelli et al., 2019).

Όσον αφορά την λάσπη, η οδηγία για την λάσπη λυμάτων (86/278/ΕΟΚ) και οι μεταγενέστερες τροποποιήσεις της ρυθμίζουν τη χρήση της επεξεργασμένης λάσπης λυμάτων (βιοστερεά) στη γεωργία, με αυστηρή παρακολούθηση των βαρέων μετάλλων, των παθογόνων μικροοργανισμών και άλλων μολυσματικών παραγόντων. Κάθε κράτος μέλος της ΕΕ διαθέτει ειδικά όργανα αρμόδια για την επιβολή της εν λόγω νομοθεσίας, ενώ οι έλεγχοι συχνά διενεργούνται από υπηρεσίες προστασίας του περιβάλλοντος (όπως η ARPA στην Ιταλία ή η ARS στη Γαλλία) για να διασφαλιστεί η ασφαλής γεωργική εφαρμογή και η προστασία του περιβάλλοντος (Collivignarelli et al., 2019).

Στην Ελλάδα, διάφοροι φορείς εμπλέκονται στη διενέργεια επιθεωρήσεων στα οινοποιεία, διασφαλίζοντας τη συμμόρφωση με τα εθνικά και τα ευρωπαϊκά πρότυπα, ιδίως όσον αφορά την περιβαλλοντική διαχείριση και τη βιωσιμότητα.

Ο Ελληνικός Γεωργικός Οργανισμός - Δήμητρα (ΕΛΓΟ-ΔΗΜΗΤΡΑ) είναι ένας από τους βασικούς φορείς που ασχολούνται με την εποπτεία του ποιοτικού ελέγχου στη γεωργία, συμπεριλαμβανομένης της αμπελουργίας. Ο ΕΛΓΟ-ΔΗΜΗΤΡΑ παρακολουθεί ολόκληρη την αλυσίδα παραγωγής, διασφαλίζοντας ότι τα οινοποιεία τηρούν τα πρότυπα όσον αφορά την καλλιέργεια, την παραγωγή και την αποθήκευση των οίνων. Ένας άλλος φορέας, το Υπουργείο Αγροτικής Ανάπτυξης και Τροφίμων, διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στη διαδικασία ελέγχου, εστιάζοντας στην προστασία των γεωγραφικών ενδείξεων και των ονομασιών προέλευσης, οι οποίες είναι ζωτικής σημασίας για τον ελληνικό αμπελοοινικό τομέα.

Επιπλέον, όσον αφορά την περιβαλλοντική διαχείριση, η Ελληνική Επιθεώρηση Περιβάλλοντος, που λειτουργεί στο πλαίσιο του Υπουργείου Περιβάλλοντος και Ενέργειας, είναι υπεύθυνη για τη διασφάλιση της συμμόρφωσης με τους περιβαλλοντικούς κανονισμούς, συμπεριλαμβανομένης της επεξεργασίας λυμάτων, της διαχείρισης στερεών αποβλήτων και άλλων πρακτικών βιωσιμότητας εντός των οινοποιείων (Melchioris & Bentes-Freire, 2023).

### **3.3 Ποιοτικός έλεγχος των επεξεργασμένων υγρών για άρδευση**

Τα υγρά απόβλητα που παράγονται κατά την οινοποίηση ρυθμίζονται επίσης σε μεγάλο βαθμό. Η οδηγία της Ευρωπαϊκής Ένωσης για την επεξεργασία αστικών λυμάτων (91/271/ΕΟΚ) και η οδηγία-πλαίσιο για τα ύδατα (2000/60/ΕΚ) θεσπίζουν κατευθυντήριες γραμμές για την επεξεργασία των υγρών αποβλήτων οινοποιείου πριν από την επαναχρησιμοποίησή τους για άρδευση. Οι διαδικασίες επεξεργασίας πρέπει να διασφαλίζουν ότι το νερό πληροί τα πρότυπα ασφαλείας τόσο για γεωργική χρήση όσο και για την προστασία του περιβάλλοντος, περιορίζοντας ιδίως τους οργανικούς ρύπους, τα μέταλλα και τους παθογόνους μικροοργανισμούς (EC, 2024).

Τα λύματα των οινοποιείων υποβάλλονται σε επεξεργασία μέσω βιολογικών και φυσικών διεργασιών, οι οποίες μπορεί να περιλαμβάνουν διήθηση και παραγωγή βιοαερίου. Αυτό το επεξεργασμένο νερό, όταν επαναχρησιμοποιείται για άρδευση, πρέπει να συμμορφώνεται με τους ευρωπαϊκούς κανονισμούς που ελέγχουν την ποιότητά του, διασφαλίζοντας ότι δεν βλάπτει τα οικοσυστήματα του εδάφους ή των υδάτων. Οι εθνικοί οργανισμοί διενεργούν ελέγχους ποιοτικού ελέγχου για να εγγυηθούν τη συμμόρφωση με τις οδηγίες αυτές.

Τα οινοποιεία σε όλη την Ευρώπη υπόκεινται σε λεπτομερείς επιθεωρήσεις από διάφορα όργανα, διασφαλίζοντας τη συμμόρφωση τόσο με την ποιότητα των προϊόντων όσο και με τα πρότυπα περιβαλλοντικής ασφάλειας. Αυτό περιλαμβάνει την παρακολούθηση της διαχείρισης και διάθεσης των υγρών αποβλήτων και της λάσπης σύμφωνα με το αυστηρό νομοθετικό πλαίσιο της ΕΕ. Οι τοπικές υπηρεσίες προστασίας του περιβάλλοντος είναι υπεύθυνες για την εποπτεία αυτών των ελέγχων και τη διασφάλιση της τήρησης των ευρωπαϊκών οδηγιών που αφορούν την επεξεργασία της λύσης και των υδάτων για τη γεωργική και περιβαλλοντική ασφάλεια.

Στην Ελλάδα, ο έλεγχος της ποιότητας του αρδευτικού νερού, ιδίως για χρήση σε αμπελώνες, ρυθμίζεται από την Εθνική Αρχή Υδάτων. Η Εθνική Υπηρεσία Διαχείρισης Υδατικών Πόρων παρακολουθεί επίσης την ποιότητα των επεξεργασμένων λυμάτων που συχνά επαναχρησιμοποιούνται στην άρδευση. Το νερό πρέπει να πληροί τα αυστηρά πρότυπα που ορίζονται από την ευρωπαϊκή οδηγία 91/271/ΕΟΚ για τα επεξεργασμένα λύματα, η οποία υπογραμμίζει τη σημασία της ποιότητας του νερού για τη βιώσιμη αμπελουργία. Πραγματοποιούνται τακτικά ποιοτικοί έλεγχοι για να διασφαλιστεί ότι τα επεξεργασμένα υγρά που χρησιμοποιούνται για άρδευση δεν βλάπτουν την υγεία του εδάφους ή την ποιότητα των αμπελιών (EC, 2024).



#### **Κεφάλαιο 4: Εφαρμογή των επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων στην άρδευση και της επεξεργασμένης λάσπης στο έδαφος**

Τα οينوποιεία παράγουν μεγάλες ποσότητες υγρών αποβλήτων χαμηλής ποιότητας. Δεν υπάρχουν πολλές διαθέσιμες πληροφορίες σχετικά με το πόσο νερό χρησιμοποιούν στην πραγματικότητα τα οينوποιεία, το οποίο από μόνο του φαίνεται να ποικίλλει. Τα λύματα από τα οينوποιεία έχουν υψηλές συγκεντρώσεις  $K^+$  και  $Na^+$  καθώς και σημαντικά επίπεδα χημικής ζήτησης οξυγόνου (chemical oxygen demand, COD). Τόσο μια σημαντική εποχιακή διακύμανση όσο και μεγάλη ποικιλομορφία υπάρχουν στα ποιοτικά χαρακτηριστικά των υγρών αποβλήτων μεταξύ των οينوποιείων. Τα υγρά απόβλητα χρησιμοποιούνται συνήθως για την άρδευση μικροσκοπικών, μόνιμων βοσκοτόπων. Η οينوποιεία μπορεί να κερδίσει πολλά από τη χρήση των υγρών αποβλήτων των οينوποιείων για την άρδευση των αμπελώνων. Η εφαρμογή υγρών αποβλήτων με υψηλές συγκεντρώσεις  $K^+$  κατά την άρδευση μπορεί να βελτιώσει τη γονιμότητα του εδάφους, αλλά μπορεί επίσης να έχει δυσμενείς συνέπειες στα χημικά χαρακτηριστικά του εδάφους με την πάροδο του χρόνου. Τα οينوποιεία οφείλουν, σύμφωνα με τους κανονισμούς της Νότιας Αφρικής, να καταγράφουν στο Τμήμα Υδάτων και Υγιεινής τα υγρά απόβλητα που προτίθενται να χρησιμοποιήσουν. Είναι απαραίτητο να παρακολουθείται η ποσότητα των λυμάτων που αρδεύονται κάθε εβδομάδα και να αξιολογείται η ποιότητα των λυμάτων μία φορά το μήνα. Θα πρέπει να ζητείται η γνώμη ενός εδαφολόγου κατά τη δημιουργία εβδομαδιαίων ισοζυγίων νερού. Θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι ιδιότητες του εδάφους, το κλίμα, η ποσότητα και η ποιότητα των υγρών αποβλήτων και η επιλογή των καλλιεργειών για άρδευση με υγρά απόβλητα οينوποιείου. Η μέτρηση των χημικών αντιδράσεων του εδάφους στα υγρά απόβλητα οينوποιείου κάθε τρεις μήνες είναι ζωτικής σημασίας.

Ένα βασικό βήμα στη διαδικασία παραγωγής κρασιού είναι η χρήση ακατέργαστου νερού. Ωστόσο, τα υγρά απόβλητα χαμηλής ποιότητας που παράγονται από αυτές τις εργασίες δεν μπορούν να διατεθούν στα φυσικά συστήματα. Οι υδάτινοι πόροι, όπως τα φυσικά ρέματα, τα ποτάμια, τα φράγματα, τα υπόγεια ύδατα και οι υγρότοποι, μπορούν να αλατωθούν και να ευτροφιστούν λόγω των υγρών αποβλήτων των οينوποιείων (Van Schoor, 2005, Laurenson et al., 2012). Επιπλέον, τα υγρά απόβλητα μπορεί να οδηγήσουν σε υπερασπίωση, αναερόβωση, αλατότητα, νατρίωση, απώλεια της δομής του εδάφους και αυξημένη ευαισθησία στη διάβρωση. Μπορούν επίσης να μολύνουν το έδαφος με μια ποικιλία χημικών ουσιών. Όταν υπάρχουν στερεά απόβλητα, μπορούν να παράγουν δυσάρεστες οσμές και να προκαλέσουν διαρροές που μολύνουν το έδαφος και τα αποθέματα νερού, αναστέλλοντας την ανάπτυξη των φυτών (Van Schoor, 2004).

Η κοινωνικοοικονομική ανάπτυξη στις επαρχίες διεθνώς, εξαρτάται από τη βιώσιμη αμπελουργία. Η εξεύρεση εναλλακτικών πηγών αρδευτικού νερού είναι απαραίτητη για τη διατήρηση της ποιότητας και της παραγωγής λόγω των επαναλαμβανόμενων ξηρασιών και των περιορισμένων φυσικών υδάτινων πόρων της περιοχής. Μια εναλλακτική παροχή νερού φαίνεται πολλά υποσχόμενη, δεδομένης της ετήσιας παραγωγής τεράστιων όγκων επεξεργασμένων αστικών λυμάτων. Τα αστικά λύματα μπορεί να έχουν αυξημένα επίπεδα  $\text{Na}^+$ ,  $\text{B}_3^+$ ,  $\text{Cl}^-$  και  $\text{SO}_4^{2-}$ , μαζί με ιχνοστοιχεία και μέταλλα, ακόμη και μετά από διάφορες διαδικασίες επεξεργασίας. Ωστόσο, συχνά περιλαμβάνει ζωτικά θρεπτικά συστατικά των φυτών, όπως N, P και  $\text{K}^+$ . Η επαναχρησιμοποίηση των αστικών λυμάτων για την άρδευση της γεωργίας θα μπορούσε να είναι επωφελής, εάν γίνεται κατάλληλος χειρισμός. Τα ανακυκλωμένα θρεπτικά συστατικά, η μικρότερη ανάγκη για λίπασμα, η προσθήκη οργανικού υλικού, η μικρότερη επιβάρυνση των αποθεμάτων γλυκού νερού και η μικρότερη μόλυνση του περιβάλλοντος είναι όλα πιθανά πλεονεκτήματα. Τα υψηλά φορτία αλάτων, ιδίως  $\text{Na}^+$ , μπορούν, ωστόσο, να επηρεάσουν αρνητικά τη βιωσιμότητα των καλλιεργειών καθώς και τα φυσικά και χημικά χαρακτηριστικά του εδάφους. Συνεπώς, είναι επιτακτική ανάγκη να θεσπιστούν πολιτικές που θα μειώσουν τη ζημία που μπορεί να προκαλέσει η αλατότητα ή/και η νατρίωση. Η εξασθένηση και η συσσώρευση τοξικών χημικών ουσιών πρέπει επίσης να ελαχιστοποιηθούν. Η πλειονότητα των δεδομένων που αφορούν τα επεξεργασμένα αστικά λύματα έχει παραχθεί από εργαστηριακές έρευνες με τη χρήση πραγματικών ή περιστασιακά συνθετικών λυμάτων (Van Schoor, 2004).

#### **4.1 Όγκος Νερού Που Χρησιμοποιείται Από Την Οινοποιία**

Οι πληροφορίες που υπάρχουν για το πόσο νερό χρησιμοποιούν οι αμπελώνες στην πραγματικότητα είναι ασυνεπείς. Σύμφωνα με μια νοτιοαφρικανική έρευνα (Sheridan et al., 2005), η οποία περιελάμβανε οινοποιεία που συνέθλιβαν έως και 22.000 τόνους σταφυλιών ετησίως, ο όγκος του ακατέργαστου νερού αυξάνεται δραματικά με την ποσότητα των σταφυλιών που συνέθλιβαν. Η κλίση της σχέσης έδειξε ότι, παρά τη σημαντική διακύμανση μεταξύ των οινοποιείων, απαιτούνται περίπου 2  $\text{m}^3$  νερού για τη σύνθλιψη ενός τόνου σταφυλιών. Στο οινοποιείο Lutzville Vineyards παράγονται ετησίως μεταξύ 30 και 40 εκατομμυρίων λίτρων κρασιού, με καταγεγραμμένο μέσο όρο 100.000  $\text{m}^3$  νερού (Kriel, 2008). Δεδομένου ότι το συγκεκριμένο οινοποιείο συνθλίβει περίπου 47.500 τόνους σταφυλιών ετησίως (G. Theron), η επεξεργασία ενός τόνου σταφυλιών απαιτεί περίπου 2,1  $\text{m}^3$  ακατέργαστου νερού. Η ποσότητα νερού που χρησιμοποιεί το οινοποιείο του Lutzville Vineyards συμφωνεί με τα ευρήματα της έρευνας που διεξήγαγαν οι Sheridan

et al. (2005), παρά το γεγονός ότι ο αριθμός των σταφυλιών που συνθλίβονται είναι σημαντικά μεγαλύτερος. Τα οινοποιεία της Αυστραλίας χρειάζονται συνήθως 3 έως 5 m<sup>3</sup> νερού για τη σύνθλιψη ενός τόνου σταφυλιών, σύμφωνα με τους Mosse et al. (2011). Από το 2010 έως το 2012, η Νότια Αφρική παρήγαγε κατά μέσο όρο 1,33 εκατομμύρια τόνους σταφυλιών ετησίως (SAWIS, 2013). Σε γενικές γραμμές, η βιομηχανία οίνου χρησιμοποιεί 2,66 εκατομμύρια λίτρα ακατέργαστου νερού ετησίως, αν υποθέσουμε ότι η οινοποίηση στη Νότια Αφρική χρειάζεται περίπου 2 m<sup>3</sup> νερού για την επεξεργασία ενός τόνου σταφυλιών. Σύμφωνα με αναφορές, τα οινοποιεία χρησιμοποιούν μεταξύ 30 και 40 τοις εκατό του νερού τους κατά την περίοδο του τρύγου (Conradie, 2015).

#### **4.2 Όγκος υγρών αποβλήτων που παράγονται κατά την οινοποίηση**

Υπάρχουν επίσης πολύ λίγες αναφορές σχετικά με τις πραγματικές ποσότητες υγρών αποβλήτων που παράγονται από τα οινοποιεία. Τα μικρά οινοποιεία θεωρείται ότι παράγουν λιγότερα από 15000 m<sup>3</sup> υγρών αποβλήτων ετησίως, ενώ τα μεσαία και μεγάλα οινοποιεία προβλέπεται να παράγουν περισσότερα από 15000 m<sup>3</sup> ετησίως (Van Schoor, 2005 και αναφορές σε αυτά). Για κάθε τόνο τεμαχισμένων σταφυλιών, τα οινοποιεία της Αυστραλίας παράγουν περίπου 5 m<sup>3</sup> λυμάτων (Charman et al., 1995). Στο οινοποιείο Berrig Estate στο Riverland της Νότιας Αυστραλίας, η ετήσια έκθλιψη περίπου 50000 τόνων σταφυλιών παράγει 175000 m<sup>3</sup> λυμάτων (Anonymous, 2010). Ως αποτέλεσμα, παράγουν περίπου 3,5 m<sup>3</sup> λυμάτων για κάθε τόνο σταφυλιών. Τα υγρά απόβλητα αποτελούν συχνά το μεγαλύτερο μέρος του ακατέργαστου νερού που εισέρχεται στα οινοποιεία. Σύμφωνα με εκτιμήσεις, το οινοποιείο Lutzville Vineyard χρησιμοποιεί 50000 m<sup>3</sup> ή το 50% του ακατέργαστου νερού, το οποίο πηγαίνει χαμένο (Kriel & Pott, 2020). Με τον ζεστό, αεράτο αέρα, το άλλο μισό νερό πιθανότατα χάνεται λόγω εξάτμισης. Αυτό σημαίνει ότι για κάθε τόνο τεμαχισμένων σταφυλιών, το συγκεκριμένο οινοποιείο παράγει περίπου 1,1 m<sup>3</sup> λυμάτων. Αντίθετα, σημαντικά λιγότερα υγρά απόβλητα - 0,359 m<sup>3</sup> και 0,357 m<sup>3</sup> ανά τόνο θρυμματισμένων σταφυλιών - παράγονται στα γαλλικά κελάρια μέσω των διαδικασιών παραγωγής λευκού κρασιού και ροζέ χωρίς δέρμα και θερμικής οινοποίησης των ερυθρών κρασιών, αντίστοιχα (Bories & Sire, 2010). Για τον ερυθρό οίνο που παρασκευάζεται με το δέρμα, καταγράφηκε ακόμη χαμηλότερος αριθμός - 0,262 m<sup>3</sup> υγρών αποβλήτων ανά τόνο θρυμματισμένων σταφυλιών (Bories & Sire, 2010).

### 4.3 Προέλευση Των Υγρών Αποβλήτων Οινοποιείου Και Των Σχετικών Ρύπων

#### 4.3.1 Πηγές ρύπων

Τα οινοποιεία διαφέρουν ως προς το μέγεθος, τον τρόπο διαχείρισης και τα πρωτόκολλα λειτουργίας. Εκτελούν συγκρίσιμες αλλά σαφώς εξειδικευμένες διαδικασίες για κάθε τοποθεσία. Ως αποτέλεσμα των διαφορών αυτών παράγονται διαφορετικά είδη και ποσότητες υγρών αποβλήτων (Van Schoor, 2005). Τα υγρά απόβλητα που δημιουργούνται μπορεί να επηρεάζονται από τη διαδικασία οινοποίησης (Bories & Sire, 2010). Τα υγρά απόβλητα που αποτελούνται κυρίως από σάκχαρα δημιουργούνται κατά τη διάρκεια της διαδικασίας οινοποίησης χωρίς δέerma. Αντίθετα, υγρά απόβλητα με υψηλή περιεκτικότητα σε αιθανόλη παράγονται σε κελάρια που χρησιμοποιούν παραδοσιακές διαδικασίες ερυθράς οινοποίησης. Η συνήθης διαδικασία οινοποίησης περιλαμβάνει διάφορα στάδια. Τα μικρά οινοποιεία μπορεί να παράγουν έως και το 80% των υγρών αποβλήτων τους κατά τη διάρκεια του τρύγου, ενώ τα μεσαία και μεγάλα οινοποιεία που λειτουργούν όλο το χρόνο παράγουν περίπου το 50% των υγρών αποβλήτων τους κατά την περίοδο του τρύγου (Van Schoor, 2005). Το νερό που χρησιμοποιείται για τις διαδικασίες καθαρισμού αποτελεί το μεγαλύτερο μέρος των υγρών αποβλήτων από τα οινοποιεία (Van Schoor, 2005).

Η χημική ζήτηση οξυγόνου (COD), η ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC), ο λόγος προσρόφησης αλάτων (sodium adsorption ratio, SAR) και το pH αποτελούν τους κύριους δείκτες της

Parameter	Unit	Minimum	Maximum	Average
Chemical Oxygen Demand (COD)	mg/L	320	296,119	11,654
Biochemical Oxygen Demand (BOD <sub>5</sub> )	mg/L	125	130,000	8024
Total Solids	mg/L	1602	79,635	11,311
Total Volatile Solids	mg/L	130	54,952	4174
Suspended Solids	mg/L	60	30,300	1435
pH	-	3.0	12.9	5.3
Total Kjeldahl Nitrogen	mg/L	0	415	110
Total Nitrogen	mg/L	10	415	118
Ammonia Nitrogen (N-NH <sub>3</sub> )	mg/L	0.001	21.1	-
Phosphorus	mg/L	3.3	188.3	39.5
Sodium	mg/L	7	470	204
Potassium	mg/L	29	353	201

Εικόνα 8: Συμβατικοί ρύποι στα υγρά απόβλητα οινοποιείων όπως αναφέρονται στη βιβλιογραφία (Skornia et al., 2020).

ποιότητας του νερού.

4.3.2 Ποιότητα των υγρών αποβλήτων που παράγονται στα οινοποιεία

Υπάρχουν πολυάριθμες αναφορές σχετικά με την ποιότητα των υγρών αποβλήτων, ιδίως όσον αφορά τη βιολογική ζήτηση οξυγόνου (BOD) ή το COD, σε αντίθεση με τον όγκο των παραγόμενων υγρών αποβλήτων. Πιστεύεται ότι το BOD αποτελεί το 66% του COD (Van Schoor, 2005). Υψηλές συγκεντρώσεις  $K^+$  και  $Na^+$  παρατηρούνται επίσης στα υγρά απόβλητα οινοποιείων (Conradie et al., 2014). Τα υγρά απόβλητα οινοποιείων μπορούν να αξιολογηθούν με τη χρήση μιας ποικιλίας μετρήσεων, αν και το COD, το pH, το SAR, το EC, το  $Cl^-$ , το  $K^+$  και το  $Na^+$  θεωρούνται σημαντικές. Οι Mulidzi et al. (2009) διεξήγαγαν το 2000 μια έρευνα για την αξιολόγηση των υγρών αποβλήτων οινοποιείων που παράγονται διεθνώς με βάση αυτά τα κριτήρια. Τα ευρήματα της έρευνας δείχνουν ότι ενώ υπάρχει σημαντική διαφορά στα μέτρα ποιότητας των υγρών αποβλήτων μεταξύ των οινοποιείων, τα περισσότερα από αυτά παρουσιάζουν επίσης σημαντική εποχική μεταβολή. Σύμφωνα με τους Arienzo et al. (2009), τα υγρά απόβλητα οινοποιείων στην Αυστραλία παρουσίασαν παρόμοια εποχική τάση. Όταν τα λύματα δύο αμπελώνων παρακολουθούνταν τακτικά, τα πρότυπα αυτά επαληθεύτηκαν (Sheridan, 2012). Όταν τα λύματα δύο αμπελώνων παρακολουθούνταν τακτικά, τα πρότυπα αυτά επαληθεύτηκαν (Sheridan, 2012).

Η σύνθεση των υγρών αποβλήτων από τα οινοποιεία επηρεάζεται επίσης από τις διάφορες τεχνικές οινοποίησης. Ενώ οι παραδοσιακές τεχνικές οινοποίησης παράγουν υγρά απόβλητα με σημαντικές ποσότητες αιθέρων και αιθανόλης, τα σάκχαρα αποτελούν το μεγαλύτερο μέρος του οργανικού φορτίου στα υγρά απόβλητα κατά την παρασκευή κρασιού χωρίς δέρμα (Bories & Sire, 2010). Από την άλλη πλευρά, οι διαταραχές στη διαδικασία μπορεί επίσης να είναι η αιτία αιχμών πολύ χαμηλής ποιότητας. Οι διακοπές των διεργασιών μπορεί να οφείλονται σε διάφορα γεγονότα, όπως διακοπές ρεύματος, πυρκαγιές, πλημμύρες, καταιγίδες, υπερφόρτωση ή υποφόρτωση των συστημάτων επεξεργασίας λυμάτων, προσωρινή έλλειψη χωρητικότητας των φραγμάτων συγκράτησης λυμάτων και έλλειψη εξειδικευμένων χειριστών (Van Schoor, 2005).

Η αξιολόγηση του νερού άρδευσης βασίζεται συνήθως στη μικροβιολογική του σύνθεση. Η χημική ποιότητα του νερού μπορεί να αξιολογηθεί με τη χρήση διαφόρων δεικτών. Οι ακόλουθοι είναι οι κυριότεροι:

- Πώς το pH και η αλκαλικότητα επηρεάζουν τη διαθεσιμότητα και τη διαλυτότητα των επικίνδυνων μετάλλων και των θρεπτικών συστατικών των φυτών. Οι σωληνώσεις, τα συστήματα καταιονισμού και ο εξοπλισμός ελέγχου μπορούν να διαβρωθούν από νερό που έχει από τη φύση του χαμηλό pH. Η καταβύθιση και η

διάλυση των ανθρακικών αλκαλικών γαιών αναφέρεται μερικές φορές ως υπολειμματικό ανθρακικό νάτριο.

- Η ηλεκτρική αγωγιμότητα αποτελεί μέτρο της αλατότητας του νερού άρδευσης.
- Η οργανική ύλη στα υγρά απόβλητα περιγράφεται με τους όρους χημική ζήτηση οξυγόνου (COD) και βιοχημική ζήτηση οξυγόνου (BOD) (Paranychianakis et al., 2015).

Οι φυσικές ιδιότητες του εδάφους μπορεί να υποβαθμιστούν λόγω των ακόλουθων παραγόντων:

- Αναλογία προσρόφησης νατρίου.
- Τα ολικά διαλυμένα στερεά και τα αιωρούμενα στερεά.
- Ιδιαίτερη τοξικότητα ιόντων, με ιδιαίτερη έμφαση στα  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$  και  $\text{B}3^+$ , επιπλέον, άλλα ιόντα όπως  $\text{SO}_4^{2-}$  (θειικά άλατα) - καθώς και διάφορα ιχνοστοιχεία και βαρέα μέταλλα.
- Αναγκαία θρεπτικά συστατικά για τα φυτά, όπως  $\text{K}^+$ , φώσφορος (P) και άζωτο (N) (Vlotman et al., 2022)

Οι κίνδυνοι για την υγεία που σχετίζονται με την έκθεση των γεωργών, των εργαζομένων και των καταναλωτών σε παθογόνους μικροοργανισμούς αποτελούν τη βάση για πολλά πρότυπα ποιότητας υγρών αποβλήτων (Qadir et al., 2010). Ως εκ τούτου, η μικροβιολογική καθαρότητα των αστικών λυμάτων είναι ζωτικής σημασίας. Το 2006, ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας (World Health Organization, WHO) επικαιροποίησε τις κατευθυντήριες γραμμές του για την ασφαλή χρήση των περιττωμάτων, του γκρίζου νερού και των υγρών αποβλήτων σε γεωργικά περιβάλλοντα (WHO, 2006). Η προηγούμενη έκδοση αυτών των κανόνων (WHO, 1989) καθόριζε μέγιστες τιμές για τα αυγά ελμινθογόνων και για τα κολοβακτηρίδια (*Firmicutes*, FC) που επιτρέπονταν στα λύματα που χρησιμοποιούνταν για άρδευση. Τα προσαρμοσμένα στην αναπηρία έτη ζωής (Disability-adjusted life years, DALY) είναι το τυπικό μέτρο της νόσου και περιλαμβάνονται στις αναθεωρημένες κατευθυντήριες γραμμές μαζί με τους στόχους που βασίζονται στην υγεία. Παρόλα αυτά, καθώς το *Escherichia coli* είναι το πιο χαρακτηριστικό είδος για τον προσδιορισμό της επικράτησης της κοπρανώδους μόλυνσης, τα FC εξακολουθούν να χρησιμοποιούνται συχνά ως κριτήριο με βάση την υγεία για τα αστικά λύματα (Paranychianakis et al., 2010). Η ποιότητα της πηγής νερού, το είδος των αποβλήτων που προστίθενται κατά τη χρήση και το επίπεδο επεξεργασίας που εφαρμόζεται στα λύματα έχουν σημαντικό αντίκτυπο στα ποιοτικά χαρακτηριστικά των λυμάτων (Pedrero et al., 2010). Η νομοθεσία συνήθως προβλέπει πρότυπα ποιότητας για την άρδευση λυμάτων λόγω αυτής της ποικιλομορφίας.

#### 4.4 Διαχείριση Υγρών Αποβλήτων Οινοποιείου

Στα οινοποιεία, τα λύματα συγκεντρώνονται συνήθως σε μία ή περισσότερες αντλίες φρεατίων. Συνήθως, το πρώτο βήμα στην επεξεργασία των υγρών αποβλήτων οινοποιείου είναι να περάσει το νερό από φίλτρο σήτας για να απομακρυνθούν στερεά, όπως φλούδες σταφυλιών, στελέχη και κουκούτσια. Αυτή η εύκολη αλλά αποτελεσματική διαδικασία εμποδίζει τα σωματίδια να φράξουν τον υπόλοιπο εξοπλισμό επεξεργασίας (Mosse et al., 2011). Τα υγρά απόβλητα έχουν συχνά όξινο pH, που μερικές φορές πέφτει κάτω από το 3. Έτσι, για να αυξηθεί το pH του νερού στο απαιτούμενο επίπεδο για τις καλλιέργειες ή το νόμο, προστίθεται ασβέστης (Van Schoor, 2005). Στη συνέχεια, το νερό διοχετεύεται με αντλία σε λίμνες για ωρίμανση ή καθίζηση, ώστε τα εναπομείναντα στερεά να καθιζάνουν. Το νερό από αυτό το στάδιο της επεξεργασίας λυμάτων μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την άρδευση συγκεκριμένων καλλιεργειών σε συγκεκριμένα εδάφη, όπως το γρασίδι kikuγυ. Ένα περαιτέρω βήμα θα μπορούσε να είναι η κυκλοφορία και ο αερισμός των λυμάτων σε φράγματα με τη χρήση ενός συστήματος αντλιών αερισμού. Η επεξεργασία των λυμάτων μπορεί να είναι αρκετά επιτυχής εάν οι διαδικασίες αυτές ελέγχονται σωστά, ιδίως όσον αφορά τη μείωση των επιπέδων COD.

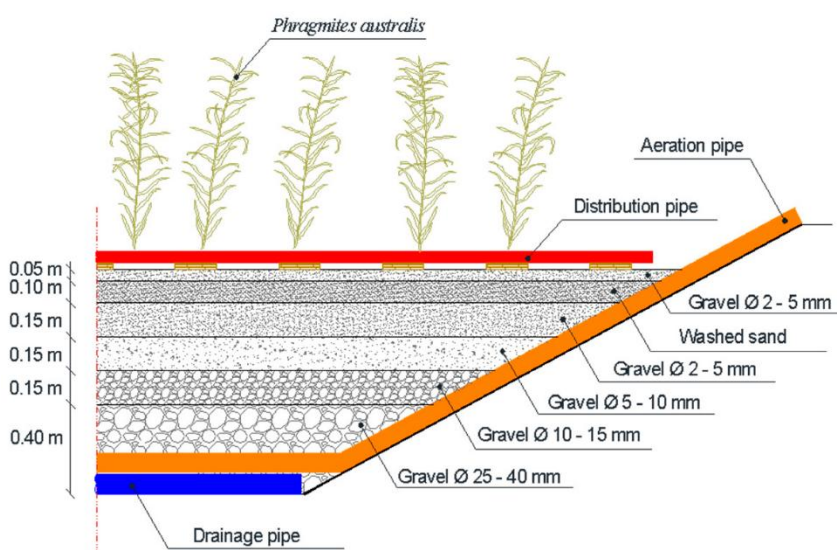
Τα λύματα των οινοποιείων, όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενο κεφάλαιο, μπορούν επίσης να επεξεργαστούν με τη χρήση της τεχνολογίας Up-flow Anaerobic Sludge Blanket (UASB) (Matthews, 2008). Η αναερόβια χώνευση είναι η βιολογική διαδικασία που χρησιμοποιεί αυτή η τεχνολογία για τη διάσπαση των οργανικών αποβλήτων σε μεθάνιο και διοξείδιο του άνθρακα όταν δεν υπάρχει αέρας. Η διαδικασία συνεπάγεται τη συνεργατική αλληλεπίδραση τεσσάρων διαφορετικών βακτηριακών ομάδων: μεθανογόνων, ακετογόνων, υδρολυτικών και ζυμωτικών-οξινογόνων. Οι κόκκοι που σχηματίζονται από τα βακτήρια καθιζάνουν σε ένα βαθύ στρώμα λάσπης που συγκρατείται στο σύστημα. Σε σύγκριση με τα αερόβια συστήματα, τα οποία παράγουν μεγάλες ποσότητες πλεονάζουσας λάσπης που πρέπει να απορριφθεί, αυτό αποτελεί σαφές πλεονέκτημα. Σύμφωνα με τους Mossé et al. (2011), το μεθάνιο παράγεται ως αέριο απόβλητο που μπορεί να ανακτηθεί και να χρησιμοποιηθεί ως πηγή ενέργειας. Η αδυναμία απομάκρυνσης των θρεπτικών συστατικών από τα αναερόβια συστήματα και η απαίτηση εξειδικευμένου προσωπικού για τη λειτουργία των συστημάτων UASB αποτελούν, ωστόσο, τα μειονεκτήματα. Το όζον συμβάλλει στην αντιμετώπιση της επίδρασης των ανθεκτικών και επικίνδυνων χημικών ουσιών στα λύματα, οι οποίες συχνά εμποδίζουν την αναερόβια χώνευση. Η προ-οζοντοποίηση διασπά αυτές τις ενώσεις σε απλούστερα μόρια, γεγονός που βελτιώνει τη βιοαποδομησιμότητα των οργανικών υλικών. Μια διαδικασία «στίλβωσης» που μπορεί να

χρησιμοποιηθεί είναι η μετα-οζονισμός. Επιπλέον, σύμφωνα με τους Mossé et al. (2011), τα έξοδα εγκατάστασης είναι συγκριτικά ακριβά. Η πλειονότητα των μονάδων UASB στον κόσμο λειτουργεί σε ποσότητες μεταξύ 100.000 και 10 εκατομμυρίων λίτρων (Matthews, 2008). Δεν υπάρχουν πολλές που λειτουργούν με λιγότερα από 50 000 λίτρα. Ένα μάλλον μικρό, πλήρως αυτόματο σύστημα UASB ικανό να επεξεργάζεται 25000 λίτρα την ημέρα χρησιμοποιείται από ένα οινοποιείο κοντά στο Franschhoek. Καθ' όλη τη διάρκεια του έτους, η συγκεκριμένη μονάδα επεξεργασίας λυμάτων διατηρεί το COD σε περίπου 250 mg/L. Επιπλέον, αποδείχθηκε ότι τα υγρά απόβλητα που παράγονται κατά την παραγωγή του χιλιανού ríscο, ενός παλαιωμένου ποτού που παρασκευάζεται με απόσταξη σταφυλιών, μπορούν να επεξεργαστούν με επιτυχία με την τεχνολογία UASB. Η μελέτη αυτή εξέτασε επίσης την τεχνολογία διευρυμένης κοκκώδους κλίνης λάσπης (Expanded Granular Sludge Bed, EGSB), αλλά σε σύγκριση με την τεχνολογία UASB, ήταν πιο δύσκολο να λειτουργήσει και απαιτούσε μεγαλύτερη επένδυση κεφαλαίου εκτός από μεγαλύτερο λειτουργικό κόστος (Petrooulos et al., 2016).

#### 4.5 Διάθεση ή αξιοποίηση υγρών αποβλήτων οινοποιείου

##### 4.5.1 Επιστροφή στους φυσικούς πόρους

Τα ανεπεξέργαστα υγρά απόβλητα από κελάρια κρασιού σπάνια, θα ήταν επιλέξιμα για απόρριψη σε φυσικούς υδάτινους πόρους σύμφωνα με τις γενικές άδειες που δημοσιεύονται στην κυβερνητική ανακοίνωση αριθ. 665 (Department of Water Affairs, 2013), σύμφωνα με το άρθρο 39 του National Water Act (1998) (Van Schoor, 2005). Τα περισσότερα λύματα εξακολουθούν να μην είναι κατάλληλα για απόρριψη σε φυσικούς υδάτινους πόρους, ακόμη και με την ποιότητα του επεξεργασμένου νερού. Ως αποτέλεσμα,



Εικόνα 9: Τμήμα της κατακόρυφης υπόγειας κλίνης ροής που βρίσκεται στο οινοποιείο Marabino (Milani et al., 2020).



η διαδικασία αυτή δεν θεωρείται πραγματικά ως επιλογή διάθεσης.

#### 4.5.2 Δεξαμενές διάθεσης

Ορισμένοι αμπελώνες χρησιμοποιούν φράγματα αποθήκευσης ή λίμνες για την άντληση των καθαρισμένων λυμάτων τους. Εάν οι λίμνες ή τα φράγματα δεν είναι επενδεδυμένα, το νερό εξατμίζεται ή διαρρέει σε βαθύτερα στρώματα του εδάφους, εάν δεν χρησιμοποιείται για άρδευση. Στην Καλιφόρνια, τα υγρά απόβλητα οινοποιείων επεξεργάζονται και αποθηκεύονται αποτελεσματικά εδώ και περίπου 30 χρόνια με τη χρήση προαιρετικών αερόβιων λιμνών πολλαπλών σταδίων (Ryder, 1995). Αυτές οι λίμνες αερίζονται επαρκώς για να αποτρέπουν την παραγωγή δυσάρεστων οσμών και είναι επενδεδυμένες για να αποτρέπουν τη διαρροή νερού σε υπόγεια υδάτινα ρεύματα.

#### 4.5.3 Άρδευση με υγρά απόβλητα οινοποιείου

Σήμερα, η πιο συνηθισμένη μέθοδος απαλλαγής από τα λύματα των κελαριών είναι η χρήση άρδευσης. Επειδή το νερό στο εδαφικό σύστημα μεταφέρει τους οργανικούς ρύπους στους αερόβιους μικροβιακούς πληθυσμούς, οι μέθοδοι εφαρμογής στο έδαφος είναι ιδανικές για την επεξεργασία του οργανικού C που βρίσκεται στα λύματα των οινοποιείων. Παρ' όλα αυτά, είναι κρίσιμο να αποφευχθεί η υφαλμύρωση. Κατά συνέπεια, είναι κρίσιμο να παρέχεται στο έδαφος αρκετός χρόνος για να γίνει αερόβιο μεταξύ των αρδεύσεων (Charman et al., 1995).

#### 4.5.4 Καλλιέργειες που αρδεύονται με υγρά απόβλητα οινοποιείου

Τις περισσότερες φορές, τα μικρά, μόνιμα βοσκοτόπια κοντά στα οινοποιεία αρδεύονται με τη χρήση λυμάτων. Στους βοσκοτόπους επικρατεί το γρασίδι Kikuyu, ενώ τα λύματα των οινοποιείων μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για την άρδευση του γρασιδιού fescue (Arienzo et al., 2009). Επιπλέον, υπάρχουν περιπτώσεις στην Αυστραλία όπου τα υγρά απόβλητα οινοποιείων χρησιμοποιούνται για την άρδευση δενδρωδών φυτών, όπως ο *Eucalyptus camaldulensis* (Charman et al., 1995). Σύμφωνα με ερευνητικά ευρήματα, τα υγρά απόβλητα που παράγονται από ένα αποστακτήριο pisco μπορούν να χρησιμοποιηθούν αποτελεσματικά για την άρδευση φυτωρίων λεμονιάς, αφού υποβληθούν σε επεξεργασία με την τεχνολογία UASB (Jeison et al., 2003). Επιπλέον, μια εμπορική παρτίδα δέντρων ευκαλύπτου χρησιμοποιήθηκε για τη διάθεση των υγρών αποβλήτων από το αποστακτήριο Pisco.

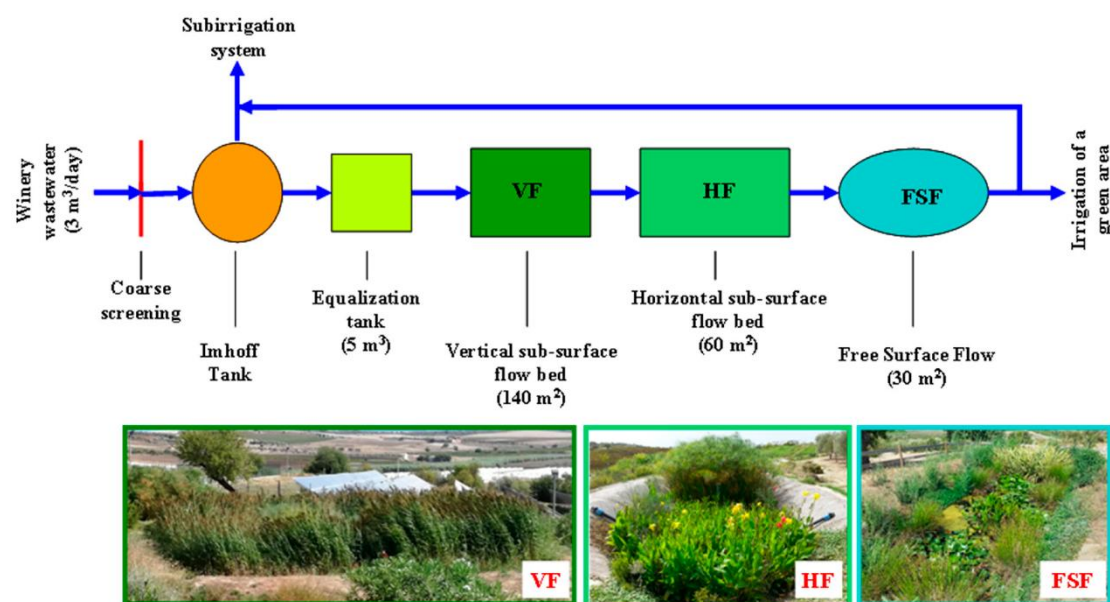
Σε μία μελέτη που πραγματοποιήθηκε στην Αυστραλία το συμπέρασμα των συγγραφέων ήταν ότι η μελέτη των επιπτώσεων των υγρών αποβλήτων της οινοποίησης δεν πρέπει να γίνεται με τη χρήση διαλυμάτων. Σε δύο ζευγαρωτές δοκιμές πεδίου, δεν υπήρξε διακριτή διαφοροποίηση στην οργανοληπτική αξιολόγηση των κρασιών όταν τα αμπέλια αρδεύονταν είτε με νερό του δικτύου είτε με λύματα οινοποιείου. Επιπλέον, τα επίπεδα  $\text{Na}^+$  στο κρασί εξακολουθούσαν να είναι κάτω από 100 mg/L στις περιοχές όπου τα αμπέλια αρδεύονταν με απόβλητα οινοποιείου, ενώ τα επίπεδα  $\text{K}^+$  στο κρασί κυμαίνονταν από 1.220 mg/L έως 1.400 mg/L και ήταν εντός των προτύπων της αυστραλιανής βιομηχανίας ερυθρών οίνων (Mosse et al., 2011).

Σύμφωνα με σχετική έρευνα, το 38% του  $\text{Na}^+$  που δόθηκε από το εμπλουτισμένο με  $\text{Na}^+$  νερό άρδευσης απορρίφθηκε από τα κτηνοτροφικά τεύτλα σε γλάστρες που καλλιεργήθηκαν το καλοκαίρι σε αμμώδες έδαφος που λήφθηκε από τη δοκιμή στο Rawsonville (Myburgh & Howell, 2014). Η συγκέντρωση  $\text{Na}^+$  στο νερό άρδευσης της μεταχείρισης 3000 mg/L COD στη δοκιμή πεδίου ήταν η ίδια με τη συγκέντρωση  $\text{Na}^+$  που χορηγήθηκε. Επιπλέον, τα κτηνοτροφικά τεύτλα μείωσαν την ποσότητα του  $\text{K}^+$  στο ανταλλάξιμο έδαφος ( $\text{K}^{\text{ex}}$ ) κατά 50%, γεγονός που υποδηλώνει ότι μπορεί επίσης να απορροφήσει το  $\text{K}^+$  που προστέθηκε μέσω των υγρών αποβλήτων του οινοποιείου (Mosse et al., 2011).

#### 4.5.5 Συστήματα άρδευσης που χρησιμοποιούνται για τη διάθεση των υγρών αποβλήτων του οινοποιείου

Οι βοσκότοποι αρδεύονται συχνά με ψεκασθήρες μεγάλου όγκου. Τα υγρά απόβλητα οινοποιείου εφαρμόστηκαν σε φυτεία ευκαλύπτων και σε γρασίδι φεστούκας (Arienzo et al., 2009) χρησιμοποιώντας άρδευση με πλημμύρα πλήρους επιφάνειας. Θα πρέπει να αναφερθεί ότι στην τελευταία περίπτωση, κατά την περίοδο συγκομιδής των σταφυλιών, στερεά διατομικής γης βρέθηκαν στον αγωγό που μετέφερε τα λύματα του οινοποιείου στη φυτεία. Για να αποφευχθούν οι αποφράξεις, αυτό απαιτούσε ετήσιο ξέπλυμα και/ή χοιρομέτρηση. Δυστυχώς, οι τεχνικές που χρησιμοποιήθηκαν για την άρδευση των διαφόρων ειδών έμειναν έξω από την πλειονότητα των προηγούμενων δημοσιεύσεων σχετικά με τη μέθοδο άρδευσης που χρησιμοποιείται για τη διάθεση των υγρών αποβλήτων οινοποιείου. Δεδομένου ότι οι αυστραλιανοί αμπελώνες αρδεύονται σχεδόν πάντα με στάγδην άρδευση, είναι λογικό να υποθέσουμε ότι το οινοποιείο Clare Valley χρησιμοποίησε σύστημα στάγδην άρδευσης για να απαλλαγεί από τα επεξεργασμένα λύματα (Baker & Hinze, 2007). Σε ένα πείραμα πεδίου στο Ισραήλ, το νερό από λίμνες

σταθεροποίησης αποβλήτων λυμάτων χρησιμοποιήθηκε για την άρδευση αμπέλων χρησιμοποιώντας τόσο υπέργεια όσο και υπόγεια στάγδην άρδευση. Ο σκοπός της στάγδην άρδευσης, ιδίως της υπόγειας στάγδην άρδευσης, ήταν να μειωθεί η πιθανότητα μόλυνσης από ασθένειες με την αποφυγή της άμεσης επαφής μεταξύ του βρώσιμου τμήματος της



Εικόνα 10: Διάταξη του πολυβάθμιου πιλοτικού τεχνητού υγροβιότοπου (Constructed Waterland, CW) που βρίσκεται στο οινοποιείο Marabino. Η άρδευση του πραγματοποιείται μέσω υγρών αποβλήτων οινοποιείου (Baker & Hinze, 2007).

καλλιέργειας και των λυμάτων.

#### 4.5.6 Επιδράσεις των υγρών αποβλήτων οινοποιείου στις εδαφικές συνθήκες

Χημική κατάσταση του εδάφους: Αν και η μακροχρόνια εφαρμογή μπορεί να έχει επιζήμιες επιπτώσεις στις χημικές ιδιότητες του εδάφους, η άρδευση με υγρά απόβλητα που περιέχουν υψηλά επίπεδα  $K^+$ , όπως τα υγρά απόβλητα οινοποιείων, μπορεί να είναι ευεργετική για τη συνολική γονιμότητα του εδάφους (Mosse et al., 2011). Η εφαρμογή υγρών αποβλήτων μπορεί να αυξήσει τα επίπεδα καλίου στο έδαφος πιο γρήγορα από ό,τι τα παραδοσιακά ανόργανα λιπάσματα, καθώς περιλαμβάνει διαλυτές και ανταλλάξιμες μορφές καλίου ( $K^+$  &  $K^+ex$ ) (Arienza et al., 2009). Επιπλέον, τα υγρά απόβλητα περιέχουν μεγάλη ποσότητα άμεσα διαθέσιμου  $K^+$ . Παρόλο που έχουν γίνει λίγες έρευνες, είναι ακόμη άγνωστο πώς οι υψηλές συγκεντρώσεις  $K^+$  επηρεάζουν τα χαρακτηριστικά του εδάφους (Mosse et al., 2011). Επιπλέον, έχουν γίνει ελάχιστες έρευνες σχετικά με το τι συμβαίνει με το  $K^+$  στα εδάφη και στα αμπέλια που ποτίζονται με λύματα οινοποιείου (Laurenson et al., 2012). Ένα πρόσθετο πλεονέκτημα της χρήσης των υγρών αποβλήτων οινοποιείου ως πηγή

K<sup>+</sup> αντί του παραδοσιακού λιπάσματος είναι ότι μπορεί να αποτελέσει μια παραγωγική μέθοδο ανακύκλωσης σε περιοχές με χαμηλό K<sup>+</sup> στο έδαφος.

Είναι πολύ πιθανό ότι το υψηλότερο K<sup>+</sup> του εδάφους θα προκαλέσει την απορρόφηση περισσότερου K<sup>+</sup> από τα αμπέλια. Σύμφωνα με τους Jackson & Lombard (1993), αυτό μπορεί να έχει αρνητικές επιπτώσεις στις αντιδράσεις των αμπελιών, όπως γλεύκη με υψηλό pH και συγκεντρώσεις μηλικού οξέος και κακή χρωματική απόδοση. Όμως, έως ότου εφαρμοστούν μεγάλες ποσότητες, η επίδραση του εδαφικού K<sup>+</sup> στις συγκεντρώσεις K<sup>+</sup> στο γλεύκος είναι συχνά ασήμαντη (Jackson & Lombard, 1993). Τα υγρά απόβλητα οινοποιείων μπορεί επίσης να περιέχουν ιόντα Ca<sup>2+</sup> και Mg<sup>2+</sup> εκτός από ιόντα Na<sup>+</sup> και K<sup>+</sup> (Mosse et al., 2011). Λόγω της ικανότητάς τους να μειώνουν το SAR, τα δύο τελευταία ιόντα μπορούν να μειώσουν τις επιπτώσεις του Na<sup>+</sup> χωρίς να θέσουν σε κίνδυνο τη δομή του εδάφους. Μια άλλη πιθανή πηγή ανησυχίας είναι η συσσώρευση Na<sup>+</sup> και Mg<sup>2+</sup> στα επιφανειακά εδάφη, η οποία οδηγεί στην ενδεχόμενη απελευθέρωση Ca<sub>2</sub> (Laurenson et al., 2012).

Φυσική κατάσταση του εδάφους: Δυστυχώς, δεν υπάρχουν αναφορές στη βιβλιογραφία σχετικά με τον τρόπο με τον οποίο η άρδευση με λύματα οινοποιείου επηρέασε τα φυσικά χαρακτηριστικά του εδάφους του χωραφιού. Ενώ υπάρχουν άφθονα στοιχεία σχετικά με την επίδραση της άρδευσης με υγρά απόβλητα οινοποιείου στα χημικά χαρακτηριστικά του εδάφους, η επίδρασή της στις φυσικές ιδιότητες του εδάφους παραμένει σε μεγάλο βαθμό ασαφής, ιδίως όταν χρησιμοποιείται για την άρδευση αμπελώνων (Buelow et al., 2015). Αυτό μπορεί να οφείλεται στο γεγονός ότι οι φυσικές ιδιότητες του εδάφους είναι εξαιρετικά μεταβλητές και οι αλλαγές τείνουν να συμβαίνουν μόνο σε μεγάλες χρονικές περιόδους, γεγονός που καθιστά δύσκολη τη μέτρηση των αλλαγών στις φυσικές ιδιότητες του εδάφους. Επιπλέον, η πλειονότητα των ερευνών διεξήχθη σε εργαστηριακές συνθήκες με συνθετικά διαλύματα.

Η άρδευση με υγρά απόβλητα έχει τη δυνατότητα να τροποποιήσει τις χημικές ιδιότητες του, οι οποίες με τη σειρά τους μπορούν να επηρεάσουν τις υδραυλικές και δομικές ιδιότητες του εδάφους (Agienzo et al., 2009). Μέσω φυσικών, χημικών και βιολογικών διεργασιών, τα αιωρούμενα και διαλυμένα στερεά -τόσο τα οργανικά όσο και τα ανόργανα- μπορούν να προκαλέσουν απόφραξη στο έδαφος (Viviani & Iovino, 2004). Ένας από τους αναμενόμενους κινδύνους που συνδέονται με την επαναχρησιμοποίηση υγρών αποβλήτων για άρδευση είναι η υποβάθμιση των υδραυλικών δυνατοτήτων του εδάφους λόγω φυσικής συμφόρησης του επιφανειακού στρώματος του εδάφους (Viviani & Iovino, 2004).

Τα χαρακτηριστικά του εδάφους και των λυμάτων συνδέονται στενά με τις επιπτώσεις της άρδευσης με λύματα. Σύμφωνα με τους Laurensen et al. (2012), η συσσώρευση μονοσθενούς κατιόντος, όπως τα  $K^+$  και  $Na^+$ , τα οποία συνήθως συνδέονται με τα λύματα των οινοποιείων, μπορεί να έχει δυσμενείς επιπτώσεις στη δομή του εδάφους. Σύμφωνα με έρευνα σε εδαφικές στήλες, η εφαρμογή λυμάτων δεν είχε καμία επίδραση στο κατώτερο τμήμα της στήλης και μείωσε μόνο την κορεσμένη υδροδυναμική αγωγιμότητα στο στρώμα βάθους 0-2 cm (Viviani & Iovino, 2004). Λόγω της αυξημένης περιεκτικότητας σε οργανική ύλη, η άρδευση με τη χρήση υγρών αποβλήτων από ελαιουργεία ενίσχυσε την υδροφοβικότητα του εδάφους και μείωσε το αποστραγγιστικό πορώδες του. Επιπλέον, παρατηρήθηκε μείωση της υδραυλικής αγωγιμότητας του εδάφους σε σύγκριση με μια θέση ελέγχου. Διαπιστώθηκε ότι οι μεγάλες και βαθιές ρωγμές συρρίκνωσης ήταν η αιτία του υψηλότερου ρυθμού διήθησης μετά την εφαρμογή τέτοιων υγρών αποβλήτων για 15 χρόνια.

Οι Barbera et al. (2013) υποστηρίζουν ότι η άρδευση με λύματα από ελαιοτριβεία μπορεί να ωφελήσει προσωρινά το έδαφος. Από την άλλη πλευρά, η συσσώρευση αλάτων σε αργιλώδη εδάφη μπορεί να προκαλέσει την κατάρρευση της δομής του εδάφους. Η υδραυλική αγωγιμότητα θα μειωθεί στη συνέχεια. Σύμφωνα με μελέτες, η χρήση υγρών αποβλήτων από την παραγωγή πετρελαίου προκάλεσε ζήτημα νατρίωσης που επηρέασε αρνητικά τα φυσικά χαρακτηριστικά του εδάφους, συμπεριλαμβανομένης της κατανομής μεγέθους πόρων, της κορεσμένης υδραυλικής αγωγιμότητας και του ρυθμού διήθησης (Barbera et al., 2013).

Η κορεσμένη και σχεδόν κορεσμένη υδραυλική αγωγιμότητα ενός εδάφους μειώθηκε από 567 mm/h και 40 mm/h σε 56 mm/h και 3 mm/h, αντίστοιχα, μετά από τέσσερα χρόνια άρδευσης με δευτεροβάθμια επεξεργασμένα αστικά λύματα (Sparling et al., 2006). Η χύδην πυκνότητα ήταν σημαντικά χαμηλότερη σε έδαφος που καλλιεργείται με λύματα από ό,τι σε έδαφος που αρδεύεται με καλό νερό σε μια μελέτη σχετικά με την επίδραση της παρατεταμένης άρδευσης με λύματα λυμάτων στα φυσικά χαρακτηριστικά του εδάφους. Επιπλέον, η χύδην πυκνότητα μειώθηκε με τη διάρκεια της άρδευσης με λύματα (Mathan, 1994), με αποτέλεσμα να αυξηθεί η υδραυλική αγωγιμότητα. Ανακαλύφθηκε επίσης ότι η εφαρμογή υγρών αποβλήτων αύξησε την ποσότητα της οργανικής ύλης στο έδαφος και μείωσε την πυκνότητα χύδην σε μια έρευνα για την αξιολόγηση των μακροπρόθεσμων επιπτώσεων αυτής της τεχνικής στα φυσικά χαρακτηριστικά του εδάφους. Η μακροχρόνια άρδευση με υγρά απόβλητα αύξησε επίσης

την κορεσμένη υδραυλική αγωγιμότητα και τη σταθερότητα των αδρανών (Vogeler et al., 2009).

Λόγω της απόφραξης των πόρων με αιωρούμενα στερεά, η έκπλυση ενός αργιλικού εδάφους και ενός αργιλώδους εδάφους με επεξεργασμένα λύματα μειώθηκε η κορεσμένη υδραυλική αγωγιμότητα σε μια έρευνα στήλης (Lado & Ben-Hur, 2009 και αναφορές σε αυτήν). Ωστόσο, το μεγάλο μέγεθος πόρων ενός αμμώδους εδάφους δεν άλλαξε την κορεσμένη υδραυλική αγωγιμότητά του. Η υψηλότερη νατρίωση βελτίωσε το σχηματισμό στεγανότητας, μείωσε τη διήθηση και αύξησε την απορροή σε ένα μη ασβεστολιθικό, αμμώδες έδαφος. Κάτω από συγκρίσιμες συνθήκες, τα υγρά απόβλητα δεν είχαν καμία επίδραση στην απόρριψη ενός ασβεστολιθικού εδάφους. Οι Tarchouna et al. (2010) αναφέρουν ότι η άρδευση με λύματα μονάδας επεξεργασίας αποβλήτων λάσπης μείωσε την κορεσμένη και ακόρεστη υδραυλική αγωγιμότητα του πολύ αμμώδους εδάφους, ωστόσο παρέμεινε αρκετά υψηλή ώστε να επιτρέπει τη διήθηση του νερού (Tarchouna et al., 2010).

Είναι ευρέως γνωστό ότι οι αυξημένες συγκεντρώσεις  $\text{Na}^+$  στο νερό άρδευσης επηρεάζουν αρνητικά τα υδραυλικά χαρακτηριστικά των εδαφών. Οι Levy και Van der Watt (1990) ανέφεραν ότι τα εδάφη με υψηλότερα επίπεδα  $\text{K}^+$  είχαν χαμηλότερη υδραυλική αγωγιμότητα και ρυθμούς διήθησης. Σύμφωνα με τους Arienzo et al. (2009), το  $\text{K}^+$  μπορεί να έχει ένα ευρύ φάσμα επιδράσεων στη διήθηση, από το να είναι παρόμοιο με το  $\text{Na}^+$  έως το να είναι παρόμοιο με το  $\text{Ca}^{2+}$ . Επιπλέον, διαπιστώθηκε ότι το  $\text{K}^+$  είχε ενδιάμεση επίδραση στις υδραυλικές ιδιότητες του εδάφους σε σύγκριση με το ανταλλάξιμο  $\text{Ca}^{2+}$  και  $\text{Na}^+$ . Η επίδραση του SAR (Sodium Absorption Ratio) και του λόγου προσρόφησης καλίου (Potassium Absorption Ratio, PAR) στην υδραυλική αγωγιμότητα του εδάφους σε χώρο διάθεσης υγρών αποβλήτων εξετάστηκε σε εργαστηριακή μελέτη, δεδομένου ότι τα απόβλητα οινοποιείων μπορεί να περιέχουν σημαντικές ποσότητες  $\text{Na}^+$  ή/και  $\text{K}^+$  (Arienzo et al., 2009). Τα ευρήματα έδειξαν ότι όταν ο SAR ή ο PAR ξεπερνούσε το 20, η υδραυλική αγωγιμότητα του εδάφους μειωνόταν σημαντικά. Ακόμα και σε αρκετά υψηλές (> 40 meq/L) συγκεντρώσεις ηλεκτρολυτών στο έδαφος, αυτές οι επιζήμιες επιδράσεις παρέμειναν. Επιπλέον, αποδείχθηκε ότι στην ίδια συγκέντρωση ηλεκτρολύτη, το  $\text{Na}^+$  είχε πιο δραματική αρνητική επίδραση από το  $\text{K}^+$  (der Watt, 2012).

Σύμφωνα με τα ευρήματα εργαστηριακής μελέτης που εξέτασε την επίδραση των SAR και PAR στην υδραυλική αγωγιμότητα του εδάφους, όταν μία από τις δύο παραμέτρους ξεπερνούσε το 20, η υδραυλική αγωγιμότητα του εδάφους μειωνόταν σημαντικά (Arienzo et al., 2009; 2012). Οι Laurensen et al. (2012) διερεύνησαν τη δέσμευση του  $\text{Na}^+$  και του  $\text{K}^+$

σε μια διαφορετική έρευνα χρησιμοποιώντας ένα συνδυασμό διαλυμάτων με γνωστές τιμές SAR και PAR. Διαπίστωσαν ότι το ποσοστό ανταλλάξιμου νατρίου (Exchangeable Sodium Percentage, ESP) που αντιστοιχεί σε δεδομένο SAR μειωνόταν προοδευτικά σε μεγαλύτερες συγκεντρώσεις  $K^+$ . Κατά συνέπεια, οι μειώσεις στο ESP θα μπορούσαν να συμβούν ως αποτέλεσμα της αύξησης του  $K^+$  και του ανταλλάξιμου ποσοστού καλίου (Exchangeable Potassium Percentage, EPP), εάν το SAR στα λύματα είναι σταθερό κατά τη διάρκεια της εσοδείας. Επομένως, σε σύγκριση με λύματα με συγκρίσιμες μονοσθενείς συγκεντρώσεις αποκλειστικά  $Na^+$ , οι αλλαγές στη δομή του εδάφους θα είναι λιγότερο εμφανείς.

Οι ανησυχίες για τη διασπορά αργίλου στα υγρά απόβλητα αμπελώνων μπορούν να μειωθούν με τη μετάβαση από καθαριστικά με βάση το  $Na^+$  σε καθαριστικά με βάση το  $K^+$ . Έχει προταθεί να χρησιμοποιούνται καθαριστικά με βάση το  $Na^+$  αντί για καθαριστικά με βάση το  $K^+$ , επειδή τα απόβλητα των οινοποιείων έχουν υψηλή περιεκτικότητα σε  $K^+$  (Arienzo et al., 2009). Ενώ η χρήση καθαριστικών διαλυμάτων με βάση το  $Na^+$  μπορεί να μειώσει το  $K^+$ , με την πάροδο του χρόνου, τα αυξημένα επίπεδα  $Na^+$  στο έδαφος θα έχουν πιθανότατα ως αποτέλεσμα περισσότερες δομικές βλάβες από ό,τι το  $K^+$ . Επιπλέον, τα εδάφη μπορεί να περιέχουν επικίνδυνες συγκεντρώσεις  $Na^+$ .

Από την άλλη πλευρά, οι καλλιέργειες που καλλιεργούνται σε χώρους διάθεσης υγρών αποβλήτων οινοποιείων μπορεί να είναι σε θέση να απορροφήσουν και να αποβάλουν το  $K^+$  από το έδαφος, μειώνοντας τη συσσώρευσή του. Επιπλέον, είναι σημαντικό να θυμόμαστε ότι το υδροξείδιο του καλίου είναι πολύ πιο ακριβό από το  $NaOH$  (Mosse). Η υδραυλική αγωγιμότητα κοντά στον κορεσμό (K) του εδάφους που προέρχεται από σχιστόλιθο, καθώς και της προσχλωσιγενούς και της αιολικής άμμου, μειώθηκε σημαντικά με τη μείωση του επιπέδου αραιώσεως των υγρών αποβλήτων οινοποιείου μετά από τρία χρόνια στην πρώτη μελέτη του είδους της, στην οποία τα υγρά απόβλητα αραιώθηκαν για την άρδευση τεσσάρων διαφορετικών εδαφών σε μια διάταξη αμπελώνα πεδίου (Howell & Myburgh, 2014b). Αξίζει να σημειωθεί ότι τα εδάφη δεν αρδεύτηκαν με νερό ποταμού, το οποίο θα επηρέαζε τον τρόπο με τον οποίο τα λύματα επηρέασαν το K κοντά στον κορεσμό. Παρά το γεγονός αυτό, τα ευρήματα υποδηλώνουν ότι εάν αραιωμένα λύματα οινοποιείου χρησιμοποιούνται σε αυτά τα εδάφη για άρδευση, θα υπάρξουν τελικά σημαντικές μειώσεις στο K κοντά στον κορεσμό. Επιπλέον, εάν οι καλλιέργειες αρδεύονται με αδιαλύτως αραιωμένα λύματα οινοποιείου, η μείωση του K κοντά στον κορεσμό μπορεί να είναι πιο αισθητή. Ανακαλύφθηκε ότι η ορυκτολογία του εδάφους και οι συγκεντρώσεις  $Na^+$  και  $K^+$  στο διάλυμα ήταν οι κύριοι προσδιοριστικοί παράγοντες της υδραυλικής

αγωγιμότητας του εδάφους χρησιμοποιώντας τρία εδάφη με διαφορετική ορυκτολογία συσκευασμένα σε εδαφικές στήλες (Buelow et al., 2015).

#### **4.6 Επίδραση της άρδευσης με αστικά λύματα στις ιδιότητες του εδάφους**

pH: Επειδή τα εδάφη είναι συχνά ιδιαίτερα ρυθμιστικά έναντι των διακυμάνσεων του pH, οι αλλαγές στο pH του εδάφους που προκαλούνται από το νερό άρδευσης συμβαίνουν σταδιακά με την πάροδο του χρόνου (Ayers & Westcot, 1985). Το pH του εδάφους μπορεί να επηρεαστεί διαφορετικά από την άρδευση με αστικά λύματα, ανάλογα με τη σύνθεση και το pH των συγκεκριμένων λυμάτων που χρησιμοποιούνται. Πολλές μελέτες έχουν δείξει ότι η άρδευση με αστικά λύματα είτε αυξάνει είτε μειώνει το pH του εδάφους, είτε δεν έχει καμία διακριτή επίδραση. Αυτό συνάδει με τις ακανόνιστες μεταβολές του pH σε εδάφη που αρδεύτηκαν για διαφορετικά χρονικά διαστήματα με επεξεργασμένα αστικά λύματα. Οι διακυμάνσεις της ρυθμιστικής ικανότητας του εδάφους είναι πιθανότατα η αιτία των ανομοιόμορφων αντιδράσεων του pH.

Αλατότητα: Προβλήματα με την αλατότητα μπορεί να προκύψουν από τη συσσώρευση υδατοδιαλυτών αλάτων στη ριζική ζώνη των φυτών, η οποία μπορεί να μειώσει τη γεωργική παραγωγή (Ayers & Westcot, 1985). Το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο μέτρο για την αξιολόγηση της αλατότητας του εδάφους είναι η ηλεκτρική αγωγιμότητα, όπως μετράται σε κορεσμένο εδαφικό εκχύλισμα (Saturated Paste Extract, ECe). Σύμφωνα με τους Rhoades et al. (1999), είναι ένας πρακτικός δείκτης της συγκέντρωσης του ολικού ιονισμένου άλατος σε υδατικά δείγματα και προσδιορίζεται εύκολα ποσοτικά. Η πλειονότητα των ερευνητικών μελετών που εξέτασαν τις επιπτώσεις της άρδευσης με αστικά λύματα στα εδάφη διαπίστωσαν ότι η άρδευση με λύματα αυξάνει σημαντικά τον ECe. Οι υψηλότερες συγκεντρώσεις αλάτων και TDS στα αρδευτικά υγρά συνδέονταν γενικά με υψηλότερες τιμές ECe στο έδαφος. Όπου οι ECe των επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων και του γλυκού νερού που χρησιμοποιήθηκαν για άρδευση ήταν σχετικά χαμηλές, δεν υπήρξε διακριτή μεταβολή στην ECe του εδάφους. Από την άλλη πλευρά, οι Hassanli et al. (2008) διαπίστωσαν ότι η άρδευση με τη χρήση επεξεργασμένων αστικών λυμάτων με χαμηλό επίπεδο αλάτων μείωσε σημαντικά την ECe του εδάφους. Επιπλέον, σε σύγκριση με τα ελαφρύτερης υφής εδάφη, η άρδευση με επεξεργασμένα αστικά λύματα αύξησε την ECe πιο έντονα σε βαρύτερα, αργιλώδη εδάφη (Adrover et al., 2017). Η θετική συσχέτιση μεταξύ της ECe του εδάφους και της συγκέντρωσης αργίλου μπορεί να συμβάλει στην εξήγηση αυτού του γεγονότος (Hassanli et al., 2008). Όταν χρησιμοποιείται νερό χαμηλής ποιότητας για άρδευση, η έκπλυση των αλάτων από τη ζώνη των ριζών είναι ιδιαίτερα κρίσιμη, επειδή



μπορεί να μειώσει την ποσότητα του εδαφικού νερού που είναι διαθέσιμη στις καλλιέργειες και να επηρεάσει αρνητικά τις αποδόσεις (Ayers & Westcot, 1985).

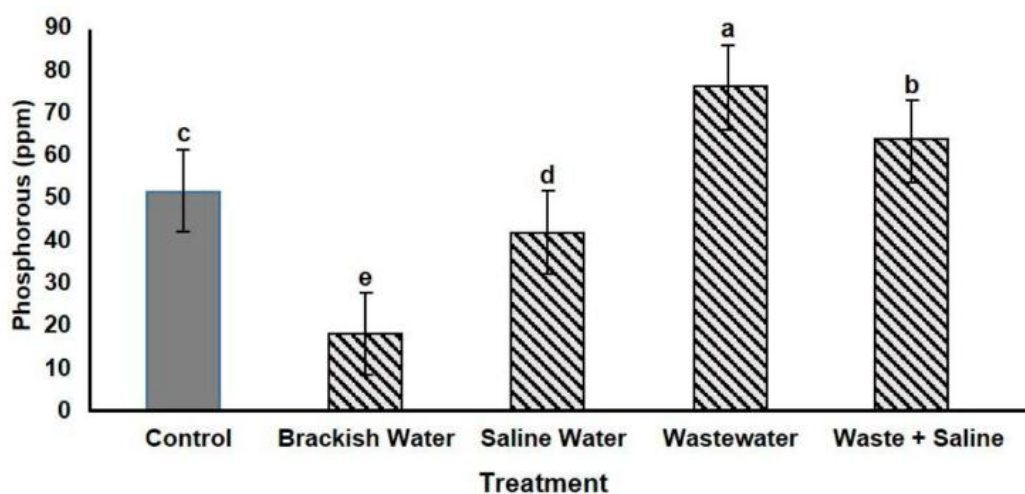
Οργανική ύλη: Η δομή και η αποθήκευση θρεπτικών στοιχείων του εδάφους μπορεί να επηρεαστεί σημαντικά από την προσθήκη οργανικής ύλης (ΟΥ) στα εδάφη από την απόρριψη αστικών λυμάτων. Η μειωμένη χύδην πυκνότητα, η αυξημένη ικανότητα συγκράτησης νερού και η αυξημένη σταθερότητα των συσσωματωμάτων είναι μερικές μόνο από τις ευνοϊκές επιδράσεις της ΟΥ στις φυσικές παραμέτρους του εδάφους. Η ΟΥ στα υγρά απόβλητα μπορεί να αυξήσει τον ολικό οργανικό άνθρακα (Total Organic Carbon, TOC) στο έδαφος, εκτός από τις επιπτώσεις του στην ικανότητα ανταλλαγής κατιόντων, τη ρυθμιστική ικανότητα, την ενζυμική δραστηριότητα και τη διαθεσιμότητα των ρύπων (Jaramillo & Restrepo, 2017 και αναφορές σε αυτό). Σύμφωνα με μελέτες, η άρδευση με αστικά λύματα έχει αποδειχθεί ότι αυξάνει την ΟΥ του εδάφους και τον οργανικό άνθρακα του εδάφους (ΟΑ). Η αύξηση της οργανικής ουσίας του εδάφους (ΟΥ) ήταν επίσης αποτέλεσμα της υπερβολικής άρδευσης με ανεπεξέργαστα λύματα για να δοθούν στις καλλιέργειες λαχανικών σε προσχωματικό έδαφος περισσότερα θρεπτικά στοιχεία. Εδώ, η ΟΥ στο ανώτερο εδαφικό στρώμα σχεδόν διπλασιάστηκε από την πλημμυρική άρδευση με ακατέργαστα λύματα. Αντίθετα, διαπιστώθηκε ότι η εφαρμογή άρδευσης με υγρά απόβλητα προκάλεσε μείωση της οργανικής ουσίας του εδάφους. Αυτό προκλήθηκε πιθανότατα από τα ευμετάβλητα αποθέματα C και N των υγρών αποβλήτων, τα οποία υποκίνησαν τη μικροβιακή ανάπτυξη (Targhouna et al., 2010). Αλλά παρατηρήθηκε επίσης ότι η ΟΥ του εδάφους δεν επηρεάστηκε σημαντικά από την άρδευση με τη χρήση επεξεργασμένων αστικών λυμάτων (Pedrero & Alarcón, 2009). Τα προαναφερθέντα υποδηλώνουν ότι η εφαρμογή ΟΥ σε εδάφη με τη χρήση επεξεργασμένων αστικών λυμάτων μπορεί να έχει άνισα αποτελέσματα.

Άζωτο: Ανάλογα με το επίπεδο επεξεργασίας, τα λύματα έχουν διαφορετικές συγκεντρώσεις οργανικού N, νιτρικών ( $\text{NO}_3$ ) και αμμωνίου ( $\text{NH}_4^+$ ). Το ολικό N δηλώνει το άθροισμα αυτού του N. Τα υπολείμματα τροφίμων, τα σωματικά εκκρίματα, τα είδη καθαρισμού που περιέχουν N, τα είδη προσωπικής υγιεινής, τα κόπρανα και τα ούρα είναι μεταξύ των πηγών αζώτου που βρίσκονται στα αστικά λύματα. Τα αυξημένα επίπεδα N που ανακαλύφθηκαν σε επεξεργασμένα λύματα που χρησιμοποιούνται για άρδευση συνδέθηκαν με αυξήσεις του ολικού N στο έδαφος. Σε ένα πείραμα σε γλάστρα, η άρδευση με επεξεργασμένα και μη επεξεργασμένα αστικά λύματα αύξησε τα επίπεδα  $\text{NO}_3$  στο έδαφος περισσότερο από την άρδευση με κατακρήμνιση. Έχει προταθεί ότι η χρήση της άρδευσης με υγρά απόβλητα για την παροχή αζώτου θα μπορούσε να μειώσει την

απαίτηση για περαιτέρω αζωτούχο λίπανση. Ωστόσο, η υπερβολική απορρόφηση από τα φυτά και/ή η έκπλυση N στις πηγές υπόγειων υδάτων θα μπορούσε να δημιουργήσει προβλήματα σε περιπτώσεις όπου τα επίπεδα N στα υγρά απόβλητα υπερβαίνουν τα απαιτούμενα για τις καλλιεργούμενες καλλιέργειες. Αυτοί οι κίνδυνοι μπορούν να μετριαστούν με την καλλιέργεια καλλιεργειών με υψηλές απαιτήσεις σε N, όπως το μαργαριταρένιο κεχρί, και με τον προγραμματισμό της άρδευσης των λυμάτων με βάση τη χρήση νερού από τις καλλιέργειες (Stewart & Sun, 1990).

Φωσφόρος: Σύμφωνα με μια μελέτη που πραγματοποιήθηκε στο Ηνωμένο Βασίλειο, τα απόβλητα τροφίμων, τα πρόσθετα τροφίμων, τα αυτόματα απορρυπαντικά πιάτων, τα προϊόντα πλυντηρίου, οι προσθήκες P για τη μείωση των επιπέδων Pb στο πόσιμο νερό και τα προϊόντα προσωπικής φροντίδας είναι οι κύριες πηγές P στα οικιακά λύματα (Comber et al., 2013). Τα αστικά λύματα μπορεί επίσης να περιέχουν P από βιομηχανικές απορρίψεις, γεωργικές απορροές και αστικές απορροές. Έχει αποδειχθεί ότι η αύξηση των επιπέδων P στο έδαφος συμβαίνει όταν χρησιμοποιούνται για άρδευση αστικά λύματα πλούσια σε P. Παρόμοια με τον μη αρδευόμενο έλεγχο, η άρδευση με υφάλμυρο και αλατούχο νερό και η άρδευση με συνδυασμό αποβλήτων και αλατούχου νερού, η άρδευση με 100% λύματα αύξησε το εδαφικό P (Διάγραμμα 1). Σύμφωνα με τους Meena et al. (2016), σε εδάφη που αρδεύονταν με επεξεργασμένα λύματα για 40 χρόνια παρατηρήθηκε αύξηση του προσβάσιμου P κατά 114%. Όταν χρησιμοποιήθηκαν μη επεξεργασμένα λύματα για άρδευση, παρατηρήθηκαν παρόμοια αποτελέσματα. Η υψηλότερη περιεκτικότητα σε P στο νερό και η πρόσθετη οργανική ύλη (OY) στην οποία μπορεί να προσροφηθεί ο P είναι οι λόγοι για τα αυξημένα επίπεδα P στα εδάφη που αρδεύονται με λύματα. Αντίθετα, ακόμη και ενώ τα λύματα περιείχαν σημαντικές ποσότητες P, η άρδευση με λύματα είχε μικρή έως καθόλου επίδραση στον εδαφικό P. Συνολικά, φαίνεται ότι οι καλλιέργειες μπορούν να λάβουν θρέψη P μέσω της άρδευσης με

τη χρήση επεξεργασμένων αστικών λυμάτων. Θα πρέπει να αναφερθεί ότι τα φυσικά αποθέματα P στον πλανήτη εξαντλούνται (Meena et al., 2016).



Διάγραμμα 1: Επίδραση της άρδευσης στην συγκέντρωση του φωσφόρου για 4 είδη νερού

Κάλιο: Πολλές μελέτες κατέδειξαν αύξηση του  $K^+$  στο έδαφος λόγω άρδευσης με αστικά λύματα πλούσια σε K, παρά το γεγονός ότι οι συγκεντρώσεις  $K^+$  στα αστικά λύματα θεωρούνται σχετικά χαμηλές σε σύγκριση με τα λύματα που προέρχονται από γεωργική επεξεργασία (Arienzo et al., 2009). Δεδομένου ότι οι διαλυτές και ανταλλάξιμες μορφές του  $K^+$  αυξάνονται ταχύτερα από ό,τι τα συμβατικά λιπάσματα, η χρήση των αστικών λυμάτων ως εναλλακτική πηγή λίπανσης με  $K^+$  είναι ιδιαίτερα ιδανική (Arienzo et al., 2009). Επιπλέον, τα φυτά μπορούν να έχουν άμεση πρόσβαση σε αυτό το  $K^+$  (Levy & Torrento, 1995). Όταν το  $K^+$  στο έδαφος είναι χαμηλό, η άρδευση με λύματα πλούσια σε K μπορεί επίσης να βελτιώσει τη γονιμότητα του εδάφους (Howell, 2016). Ωστόσο, η μακροχρόνια άρδευση με λυμάτων πλούσια σε K μπορεί να έχει επιζήμιες επιπτώσεις στις χημικές και φυσικές ιδιότητες του εδάφους (Laurenson et al., 2012). Τα επίπεδα  $K^+$  στα συγκεκριμένα λύματα που χρησιμοποιούνται καθορίζουν πόσο επηρεάζει η άρδευση με λύματα τα επίπεδα  $K^+$  στο έδαφος. Οι Pedrero και Alarcón (2009) προτείνουν ότι η άρδευση με λύματα που έχουν σχετικά μέτριες ποσότητες  $K^+$  μπορεί να μην έχει μεγάλη επίδραση στο  $K^+$  του εδάφους.

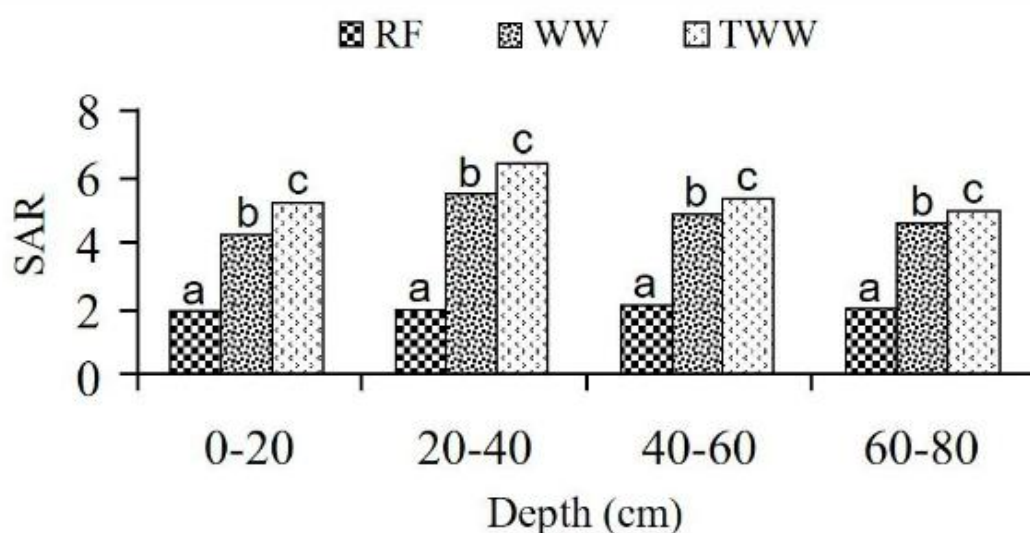
Ασβέστιο: Εκτός από απαραίτητο θρεπτικό συστατικό για τα φυτά, το ασβέστιο συμβάλλει επίσης στη ρύθμιση του pH του εδάφους και στη διατήρηση της δομικής σταθερότητας των εδαφών (Wuddivira & Camps-Roach, 2007). (Bache, 1984). Σύμφωνα με διάφορες μελέτες (Kiziloglu et al., 2007; Galavi et al., 2010; Rana et al., 2010; Thapliyal et al., 2011), η άρδευση με λύματα φαίνεται να αυξάνει τα επίπεδα  $Ca^{2+}$  στο έδαφος. Η προσθήκη  $Ca^{2+}$  από την άρδευση με υγρά απόβλητα όχι μόνο μπορεί να βελτιώσει την ποσότητα  $Ca^{2+}$  που είναι διαθέσιμη στα φυτά, αλλά τα υγρά απόβλητα με σημαντικές συγκεντρώσεις  $Mg^{2+}$  και  $Ca^{2+}$  μπορούν επίσης να συμβάλουν στον μετριασμό των

αρνητικών επιπτώσεων της υπερβολικής εφαρμογής  $\text{Na}^+$  μειώνοντας το SAR (Howell, 2016). Σύμφωνα με ορισμένες έρευνες, τα επίπεδα  $\text{Ca}^{2+}$  στο έδαφος επηρεάζονται περισσότερο από τα νερά των πηγών με υψηλότερη περιεκτικότητα σε  $\text{Ca}^{2+}$  από ό,τι τα λύματα (Neilsen et al., 1991; Heidarpour et al., 2007). Από την άλλη πλευρά, παρά την υψηλή περιεκτικότητα του νερού σε  $\text{Ca}^{2+}$ , τα επίπεδα  $\text{Ca}^{2+}$  στο έδαφος μειώθηκαν όταν τα επεξεργασμένα λύματα χρησιμοποιήθηκαν για άρδευση (Laurenson, 2010). Αυτό θα μπορούσε να εξηγηθεί από αλλαγές στην περιεκτικότητα του εδάφους σε  $\text{Ca}^{2+}$ , υπερβολικές απώλειες από την έκπλυση ή την πρόσληψη  $\text{Ca}^{2+}$  από τα φυτά (Abdelrahman et al., 2011).

Μαγνήσιο: Οι Tharliyal et al., (2013) έχουν αποδείξει ότι τα αστικά λύματα είναι μια εφικτή πηγή  $\text{Mg}^{2+}$  στα εδάφη. Ωστόσο, ορισμένες έρευνες δεν διαπίστωσαν τέτοια επίδραση. Σύμφωνα με τους Abdelrahman et al. (2011), η άρδευση με τη χρήση αστικών λυμάτων έχει σε ορισμένες περιπτώσεις μειώσει ακόμη και τις ποσότητες  $\text{Mg}^{2+}$  στο έδαφος. Παρόλο που οι ποσότητες  $\text{Mg}^{2+}$  στους δύο τύπους νερού ήταν ίδιες, το  $\text{Mg}^{2+}$  στο έδαφος μειώθηκε επίσης σε περιοχές όπου η άρδευση με αστικά λύματα συγκρίθηκε με την άρδευση με νερό πηγής (Neilsen et al., 1991). Η πιο πιθανή εξήγηση για τη μείωση του εδαφικού  $\text{Mg}^{2+}$  μέσω της ανταλλαγής μάζας είναι τα υψηλά επίπεδα  $\text{Na}^+$  και  $\text{K}^+$  των υγρών αποβλήτων.

Νάτριο: Μεταξύ των συστατικών που βρίσκονται στα αστικά λύματα και θεωρούνται τα πιο επικίνδυνα είναι το νάτριο. Το ανακτημένο νερό έχει συχνά 1,5 έως 2 φορές περισσότερο αλάτι από το δημοτικό πόσιμο νερό, επειδή τα ιόντα αυτά είναι δύσκολο να απομακρυνθούν από τα παραδοσιακές Εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων (Wastewater treatment Works, WWTW) (Chen et al., 2013a). Η υπερβολική συσσώρευση  $\text{Na}^+$  στο έδαφος μπορεί να οδηγήσει σε συνθήκες νατρίου στο έδαφος. Σύμφωνα με τους Tak et al. (2012), οι συνθήκες αυτές χαρακτηρίζονται συχνά από αυξημένη απορροή, επιφανειακή κρούστα, απόφραξη των εδαφικών πόρων, διόγκωση και διασπορά των αργίλων και παρεμπόδιση της διήθησης του νερού. Η ροή του νερού μέσα και μέσα στο εδαφικό προφίλ παρεμποδίζεται από τη φυσική υποβάθμιση του εδάφους, η οποία περιορίζει τη διαθέσιμη ποσότητα νερού στις ρίζες των ενεργά αναπτυσσόμενων φυτών. Η σχέση μεταξύ  $\text{Na}^+$  και  $\text{Ca}^{2+}$  και  $\text{Mg}^{2+}$ , ή SAR, είναι η πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη μετρική για τον χαρακτηρισμό της περιεκτικότητας του νερού και του εδάφους σε  $\text{Na}^+$ . Ως αποτέλεσμα, ο κίνδυνος νατρίου του νερού άρδευσης προβλέπεται συχνά με τη χρήση του λόγου προσρόφησης νατρίου (SAR) (Tak et al., 2012). Για παράδειγμα, το SAR σε σχέση με το ECe αποτελεί τη βάση για τις κατευθυντήριες γραμμές για την αξιολόγηση του κινδύνου νατρίου του νερού άρδευσης. Η δομή του εδάφους μπορεί να υποφέρει εάν τα υγρά

άρδευσης περιλαμβάνουν υψηλές συγκεντρώσεις  $\text{Na}^+$ . Όταν τα εδάφη αρδεύονταν με αστικά λύματα, έχουν καταγραφεί αυξήσεις του ανταλλάξιμου εδαφικού  $\text{Na}^+$  και/ή του SARS (Kiziloglu et al., 2007; Galavi et al., 2010; Morugán-Coronado et al., 2011; Kallel et al., 2012). Παρομοίως, σε σύγκριση με τις συνθήκες βροχής, η SARS ενισχύθηκε από την άρδευση με χρήση νερού πηγής και επεξεργασμένων λυμάτων σε αμμώδη εδάφη (Bedbabis et al., 2014) (Διάγραμμα 2). Σύμφωνα με τους Andrews et al. (2016), μια μελέτη που διεξήχθη σε μια υγρή περιοχή όπου τα εδάφη αρδεύονταν με αστικά λύματα για περισσότερα από 50 χρόνια αποκάλυψε ότι οι αυξημένες ποσότητες  $\text{Na}^+$  στο νερό άρδευσης -και όχι απαραίτητα μεγαλύτερες ποσότητες  $\text{Ca}^{2+}$  ή  $\text{Mg}^{2+}$  ήταν η αιτία για την αύξηση του SARS σε περιοχές που αρδεύονταν με λύματα. Πιθανότατα, η αυξημένη χρήση αποσκληρυντών νερού στην περιοχή ήταν η αιτία για το υψηλό επίπεδο  $\text{Na}^+$  σε αυτά τα λύματα. Η συγκέντρωση  $\text{Na}^+$  σε αργιλικό έδαφος σε μεσογειακό περιβάλλον μειώθηκε με την προσθήκη λιπάσματος σε επεξεργασμένα αστικά λύματα (Netzer et al., 2014). Το  $\text{Na}^+$  πιθανώς ανταγωνιζόταν με τα κατιόντα στο λίπασμα NPK για θέσεις προσρόφησης στο σύμπλοκο ανταλλαγής του εδάφους. Σύμφωνα με προηγούμενες έρευνες (Ayers & Westcot, 1985; Dudley et al., 2008), οι ποσότητες άρδευσης πρέπει να είναι μεγαλύτερες από τη χρήση νερού από τις καλλιέργειες, προκειμένου να ενθαρρύνεται η έκπλυση αλάτων και να διατηρείται η αλατότητα του εδάφους κάτω από τα όρια για συγκεκριμένες καλλιέργειες. Ωστόσο, η έρευνα αποκάλυψε ότι σε αργιλώδη εδάφη, η τεχνική αυτή επιτάχυνε τη



Διάγραμμα 2: Επίδραση της άρδευσης με επεξεργασμένα απόβλητα (TWW), νερό πηγαδιού (WW) στη SAR, σε σύγκριση με νερό βροχής (RF) (Netzer et al., 2014)

συσσώρευση  $\text{Na}^+$  και αύξησε το SARS (Netzer et al., 2014).

Χλωρίδιο: επειδή το Cl είναι ελάχιστα απαραίτητο για τα φυτά (Tak et al., 2012). Εάν όμως υπάρχουν σημαντικές συγκεντρώσεις Cl<sup>-</sup> στο έδαφος, μπορεί να είναι επιβλαβείς για τα φυτά. Δεδομένου ότι το χλώριο χρησιμοποιείται σε διαδικασίες απολύμανσης για την εξάλειψη των επικίνδυνων μικροοργανισμών από τα λύματα πριν από την επαναχρησιμοποίηση, τα τριτοβάθμια επεξεργασμένα αστικά λύματα έχουν συχνά υψηλές συγκεντρώσεις Cl<sup>-</sup> (Asano & Levine, 1996). Η επεξεργασία των αστικών λυμάτων για σκοπούς άρδευσης έχει αποδειχθεί ότι ενισχύει το Cl<sup>-</sup> στο έδαφος (Hogg et al., 1997- Pedrero & Alarcón, 2009- Bedbabis et al., 2015). Δεδομένου ότι το C<sup>-</sup> (Segal et al., 2011) έχει ισχυρή συσχέτιση με την EC, χαμηλό σχετικό ρυθμό απορρόφησης (δηλ. τον λόγο των απορροφημένων προς τις προσφερόμενες ποσότητες), χαμηλό ρυθμό προσρόφησης και υψηλή κινητικότητα στο έδαφος, καθώς και συχνή εμφάνιση στα λύματα, έχει προταθεί ότι το Cl<sup>-</sup> είναι ένας καλός δείκτης για την εκτίμηση των φορτίων αλάτων. Ενώ τα Cl<sup>-</sup> και Na<sup>+</sup> θεωρούνται τα κύρια συστατικά που επηρεάζουν την αλατότητα του εδάφους (Chen et al., 2013a), μια άλλη μελέτη διαπίστωσε ότι το Cl διαρρέει από το έδαφος πιο εύκολα από το Na<sup>+</sup> (Netzer et al., 2014). Ως αποτέλεσμα, η διαχείριση της υπερβολικής ποσότητας Cl<sup>-</sup> στο έδαφος είναι πιθανώς απλούστερη από τη διαχείριση της υψηλής ποσότητας Na<sup>+</sup> στο έδαφος.

Ιχνοστοιχεία: Τα μικροθρεπτικά στοιχεία, γνωστά και ως ιχνοστοιχεία, αν και χρειάζονται σε πολύ μικρότερες ποσότητες από τα μακροθρεπτικά στοιχεία όπως το N, ο P και το K<sup>+</sup>, είναι ζωτικής σημασίας για την ανάπτυξη των φυτών. Παραδείγματα αυτών των στοιχείων είναι το βόριο (B<sup>3+</sup>), ο χαλκός (Cu<sup>2+</sup>), ο σίδηρος (Fe<sup>2+</sup>), το μαγγάνιο (Mn<sup>2+</sup>), το μολυβδαίνιο (Mo<sup>2+</sup>) και ο ψευδάργυρος (Zn<sup>2+</sup>). Λόγω της μόλυνσης από τα βιομηχανικά λύματα, τα ιχνοστοιχεία μετάλλων βρίσκονται συνήθως στα αστικά λύματα σε πολύ χαμηλές ποσότητες (Tak et al., 2012). Η άρδευση με αστικά λύματα έχει αποδειχθεί ότι αυξάνει τα επίπεδα του B<sup>3+</sup>, Cu<sup>2+</sup>, Fe<sup>2+</sup>, Mn<sup>2+</sup>, Mo<sup>2+</sup> και Zn<sup>2+</sup> (Meena et al., 2016). Παρόλα αυτά, υπάρχουν αντιφατικές αναφορές στη βιβλιογραφία σχετικά με τον τρόπο με τον οποίο η άρδευση με λύματα επηρεάζει τα ιχνοστοιχεία του εδάφους. Τα επίπεδα Cu<sup>2+</sup> και Zn<sup>2+</sup> δεν επηρεάστηκαν σημαντικά από την άρδευση με υγρά απόβλητα, ωστόσο τα επίπεδα Fe<sup>2+</sup> και Mn<sup>2+</sup> επηρεάστηκαν (Mohammad & Mazahreh, 2003). Επιπλέον, παρατηρήθηκε ότι η άρδευση με υγρά απόβλητα δεν είχε σταθερή επίδραση στο Cu<sup>2+</sup> του εδάφους και καθόλου επίδραση στο Fe<sup>2+</sup>, Mn<sup>2+</sup> ή Zn<sup>2+</sup> του εδάφους (Rusan et al., 2007).

Βαρέα μέταλλα: Ανάλογα με την πηγή και το επίπεδο επεξεργασίας, βαρέα μέταλλα όπως αρσενικό (As<sup>3+</sup>), Cd<sup>2+</sup>, χρώμιο (Cr<sup>3+</sup>), Pb<sup>2+</sup>, Hg<sup>2+</sup> και νικέλιο (Ni<sup>2+</sup>) μπορούν να βρεθούν στα αστικά λύματα σε ποικίλες ποσότητες. Παρόλο που οι συγκεντρώσεις βαρέων

μετάλλων στο έδαφος είναι συχνά χαμηλές, η χρήση ανακτημένου νερού μπορεί να προκαλέσει συσσώρευση βαρέων μετάλλων με την πάροδο του χρόνου (Chen et al., 2013b). Παρ' όλα αυτά, οι παραδοσιακές μέθοδοι επεξεργασίας μπορούν να εξάγουν αποτελεσματικά τα βαρέα μέταλλα από το ρεύμα υγρών αποβλήτων, συγκεντρώνοντάς τα στην λάσπη ή στα απόβλητα στερεάς φάσης (Chirasa, 2003- Qdais & Moussa, 2004). Στο πλαίσιο αυτό αποδείχθηκε ότι η άρδευση με τη χρήση λυμάτων που έχουν υποστεί τριτοβάθμια επεξεργασία δεν οδήγησε σε αξιοσημείωτη συσσώρευση βαρέων μετάλλων στα εδάφη (Christou et al., 2014; Bedbabis et al., 2015). Από την άλλη πλευρά, η συσσώρευση βαρέων μετάλλων σε εδάφη που αρδεύονται με επεξεργασμένα αστικά λύματα έχει καταδειχθεί από πολλές έρευνες (Rattan et al., 2005; Rusan et al., 2007; Ghosh et al., 2012; Bao et al, 2014; Meena et al, 2016). Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι αρκετές από αυτές τις μελέτες δεν προσδιόρισαν το επίπεδο επεξεργασίας που εφαρμόστηκε στα λύματα πριν από την άρδευση. Δεδομένου ότι τα βαρέα μέταλλα εξαλείφονται από τα λύματα κυρίως μόνο κατά τα στάδια της τριτοβάθμιας επεξεργασίας, ο βαθμός επεξεργασίας είναι κρίσιμος (Asano et al., 2007). Ωστόσο, είναι σαφές ότι η άρδευση είτε με ελάχιστα επεξεργασμένα είτε με ανεπεξέργαστα αστικά λύματα πιθανότατα θα αυξήσει την ποσότητα των βαρέων μετάλλων στα εδάφη (Abunada & Nassar, 2015; Liu et al., 2005; Rana et al, 2010; Singh et al, 2016).

#### 4.7 Χρήση της λάσπης λυμάτων ως λίπασμα στο έδαφος

Δεδομένου ότι η λάσπη που παράγεται στις εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων είναι οργανικής φύσης, περιλαμβάνει θρεπτικά συστατικά. Η χρήση της ως λίπασμα σε γεωργικές εκτάσεις είναι μια προσέγγιση για την απαλλαγή από αυτά τα απόβλητα. Στην πραγματικότητα, μια αυξανόμενη πρακτική τα τελευταία χρόνια είναι η χρήση της λάσπης λυμάτων ως οργανικό πρόσθετο στη γεωργία. Σύμφωνα με τους Rigueiro-Rodriguez et al. (2012), η εφαρμογή λιπάσματος μπορεί να αλλάξει την απόδοση ορισμένων καλλιεργειών και να μειώσει την πιθανότητα έκπλυσης θρεπτικών στοιχείων (Rigueiro-Rodriguez et al. 2012).

Εκτός από ουσίες που είναι επιβλαβείς για το περιβάλλον (βαρέα μέταλλα και άλλοι ρυπαντές, όπως κάδμιο, χρώμιο, χαλκός, υδράργυρος, νικέλιο, μόλυβδος, ψευδάργυρος και παθογόνα, Bayo et al., 2010; Bonano et al., 2013), η λάσπη που παράγεται κατά τον καθαρισμό των υγρών αποβλήτων μπορεί επίσης να περιέχει ουσίες που είναι ωφέλιμες για το έδαφος, όπως οργανική ύλη και φυτοθρεπτικά συστατικά, άζωτο, φωσφόρο ή κάλιο. Οι λάσπες αυτές διακρίνονται για την υψηλή ρευστότητά τους και την ετερογενή τους σύνθεση, η οποία ποικίλλει ανάλογα με τον τόπο προέλευσης των λυμάτων και τους περιβαλλοντικούς παράγοντες που τα περιβάλλουν (MMARM 2009). Άλλα συστατικά συγκεντρώνονται στην λάσπη μόλις απομακρυνθεί το νερό, το οποίο αποτελεί το 92-96% της συνολικής μάζας (Navalon and Valor 2011).

Η λάσπη μπορεί να σταθεροποιηθεί και να βελτιωθεί πριν από την εφαρμογή της στο γεωργικό έδαφος με την επεξεργασία της με αντιδραστήρια όπως ασβέστης, αργιλικό νάτριο, θειικό αργίλιο, θειικός σίδηρος, ακόμη και πολυμερή με ενεργές ομάδες που χρησιμοποιούνται σε αντιδράσεις ανταλλαγής (πολυηλεκτρολύτης) (Elias 2009).

Η λάσπη λυμάτων έχει αποτελέσει αντικείμενο πολυάριθμων ερευνών σχετικά με τη χρήση της ως λίπασμα. Η εξέταση των Agrawal και Singh (2008) σχετικά με τα πιθανά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της εφαρμογής στο έδαφος χρήζει προσοχής. Τα κύρια χαρακτηριστικά της λάσπης λυμάτων, ο τρόπος με τον οποίο η εφαρμογή της επηρεάζει τις ιδιότητες του εδάφους, ο τρόπος με τον οποίο επηρεάζει την ανάπτυξη, την απόδοση και τη συσσώρευση βαρέων μετάλλων σε διάφορα φυτά, καθώς και οι κίνδυνοι που συνεπάγεται η χρήση της ως βελτιωτικό, περιγράφονται στην παρούσα ανασκόπηση. Πρόσθετες έρευνες (Fytilli and Zabaniotou 2008; Wang et al. 2008; Smith 2009) συνοψίζουν τις πρωταρχικές τεχνικές διαχείρισης της ιλύος και τις τεχνολογικές λύσεις που είναι διαθέσιμες για τον σκοπό αυτό. Όταν υπάρχει διαθέσιμο έδαφος, η χρήση του εδάφους συνιστάται ως η καλύτερη επιλογή διαχείρισης.



Στην Ελλάδα, η χρήση της λάσπης λυμάτων για γεωργικούς σκοπούς διέπεται και επιτρέπεται βάσει της ευρωπαϊκής οδηγίας 86/278 (όπως τροποποιήθηκε από την οδηγία 219/2009). Ωστόσο, δεδομένου ότι τα διάφορα είδη και συστατικά των φυτών απορροφούν διαφορετικές ποσότητες βαρέων μετάλλων, έχει αποδειχθεί σε ορισμένες έρευνες ότι ο απλός έλεγχος της λυματολάσπης για τη συγκέντρωση βαρέων μετάλλων στο έδαφος δεν επαρκεί για να συσχετίσει τον κίνδυνο που ενέχει (Singh and Agrawal 2008).

#### 4.7.1 Επιδράσεις της εφαρμογής λάσπης λυμάτων στις ιδιότητες του εδάφους

Η δυνατότητα ανακύκλωσης σημαντικών συστατικών, όπως η οργανική ύλη, το N, ο P και άλλα θρεπτικά συστατικά των φυτών, έχει οδηγήσει σε αύξηση της χρήσης της λάσπης λυμάτων για εφαρμογή στο έδαφος (Martinez et al., 2002). Η εφαρμογή της στο έδαφος επιτρέπει την ανακύκλωση των θρεπτικών στοιχείων και μπορεί να μειώσει την απαίτηση για εμπορικά λιπάσματα στις καλλιέργειες (Sommers, 1977). Επειδή οι λάσπες είναι οργανικά λιπάσματα, η γονιμότητα του εδάφους αυξάνεται για μεγάλο χρονικό διάστημα (Archie and Smith, 1981).

Ωστόσο, η απρόσεκτη προσθήκη λάσπης μπορεί να αλλοιώσει τις ιδιότητες του εδάφους, ιδίως αν περιέχει υψηλά επίπεδα μετάλλων και άλλων επικίνδυνων ουσιών. Η εφαρμογή της λάσπης λυμάτων βελτίωσε τις φυσικές συνθήκες του εδάφους (Erstein, 1975). Έχει παρατηρηθεί ότι τα εδάφη που έχουν υποστεί επεξεργασία με λάσπη αστικών λυμάτων (Tsadilas et al., 1995) έχουν υψηλότερα επίπεδα pH.

Από τη μελέτη των φυσικοχημικών δεδομένων που αποκτήθηκαν μεταξύ 1998 και 2002 σε μια επιλογή λυματολάσπης από διάφορα κράτη, προέκυψε ότι το pH μπορεί να κυμαίνεται από όξινο έως αλκαλικό (Parkrain et al., 1998; Martinez et al., 2002; Nandakumar et al., 1998). Η φαινόμενη πυκνότητα (bulk density), το πορώδες και η ικανότητα συγκράτησης νερού του εδάφους ενισχύθηκαν με την προσθήκη οργανικής ύλης με τη μορφή κομποστοποιημένης λάσπης (Ramulu, 2002).

Η προέλευση των λυμάτων, οι διαδικασίες επεξεργασίας των λυμάτων και οι διαδικασίες επεξεργασίας της λάσπης είναι μερικά από τα στοιχεία που επηρεάζουν τις συγκεντρώσεις μετάλλων στην λάσπη των λυμάτων (Hue and Ranjith, 1994). Σύμφωνα με τους Hue και Ranjith (1994) και τους Delibacak και Ongun (2018), τα χαρακτηριστικά του εδάφους, συμπεριλαμβανομένων του pH, του δυναμικού οξειδοαναγωγής (Eh), της περιεκτικότητας σε οργανική ύλη και της συγκέντρωσης σεσκιού, επηρεάζουν τη

βιοδιαθεσιμότητα των μετάλλων που μεταφέρονται από την ιλύ στο έδαφος, καθώς και τον ρυθμό με τον οποίο εφαρμόζεται η λάσπη στο έδαφος.

<b>Properties</b>	<b>Effect</b>
<b>Physical</b>	
pH	Decrease
	Increase
Soil aggregate stability	Increase
Bulk density	Decrease
Water holding capacity	Increase
Porosity	Increase
Erosion	Decrease
Humus content	Increase
<b>Chemical</b>	
Toxic elements	Increase
Soil organic carbon	Increase
Electrical conductance	Increase
N and P	Increase
Cation exchange capacity	Increase
<b>Biological</b>	
Yeast population	Increase
Pathogenic organisms	Increase
Aerobic bacteria	Increase

Πίνακας 1: Επίδραση των τροποποιήσεων της λάσπης λυμάτων σε επιλεγμένες φυσικές, χημικές και βιολογικές ιδιότητες του εδάφους (Singh and Agrawal, 2008)

#### 4.7.2 Επιβλαβείς επιπτώσεις

Μια νέα προσέγγιση για την αποκατάσταση του εδάφους είναι η εφαρμογή της λάσπης λυμάτων σε γεωργικές πρακτικές. Λόγω των πλεονεκτημάτων που παρέχει η λάσπη λυμάτων για τις ιδιότητες των εδαφών που λιπαίνονται ή ανακτώνται, η χρήση της στην πράξη αυξάνεται. Ο Epstein (2003) σημειώνει ότι η προσθήκη λάσπης λυμάτων αυξάνει την ποσότητα της οργανικής ύλης στο έδαφος εκτός από τον εμπλουτισμό του με θρεπτικά συστατικά (Fyttili and Zabaniotou, 2008).

Δεδομένης της χαμηλής συγκέντρωσης οργανικής ουσίας στα εδάφη, η αναπλήρωση είναι συχνά απαραίτητη. Έτσι, ένα προσιτό και αποτελεσματικό υποκατάστατο των σημερινών τεχνικών (ανόργανη λίπανση, κοπριά κ.λπ.) θα μπορούσε να είναι η προσθήκη λάσπης λυμάτων στα εδάφη.

Αν και η χρήση της λάσπης λυμάτων στη γεωργία έχει σίγουρα οφέλη, υπάρχουν επίσης κάποιοι σημαντικοί κίνδυνοι. Θα πρέπει να επισημάνουμε την ύπαρξη οργανικών ρύπων, βαρέων μετάλλων και λοιμώξεων μεταξύ αυτών (Harrison et al., 2006; Oleszczuk, 2006; Smith, 2009). Παρακάτω φαίνονται οι πιο συχνά εμφανιζόμενοι παράγοντες με επιβλαβείς επιπτώσεις κατά την εφαρμογή λάσπης στο έδαφος.

Country	Salmonella	Other pathogens
Poland	No occurrence	Faecal streptococci: < 100/g
France	8 MPN/10g DM	Enterovirus: 3 MPCN/10g of DM Helminths eggs: 3/10g of DM
Finland	Not detected in 25 g	Escherichia coli < 1000 cfu
Italy	1000 MPN/g DM	-
Luxembourg	-	Enterobacteria: 100/g no eggs of worm likely to be contagious
Hungary	-	Faecal coli and faecal streptococci decrease below 10% of original number
Poland	Sludge cannot be used in agriculture if contains salmonella	-

Πίνακας 3: Πρότυπα για τις μέγιστες συγκεντρώσεις παθογόνων μικροοργανισμών στην λάσπη λυμάτων (European Commission, 2009)

Metal	Sludge	Soil		
		5<pH<6	6<pH<7	pH>7
Cd	10	0.5	1	1.5
Cr	1000	50	75	100
Cu	1000	30	50	100
Hg	10	0.1	0.5	1
Ni	300	30	50	70
Pb	750	70	70	100
Zn	2500	100	150	200

Πίνακας 2: Προτεινόμενες οριακές τιμές για τα δυνητικά τοξικά στοιχεία (PTE) στην ιλύ λυμάτων και στο έδαφος (mg kg<sup>-1</sup> dw) (European

## Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα

Τα οινοποιεία παράγουν μεγάλες ποσότητες υγρών αποβλήτων χαμηλής ποιότητας, ιδίως κατά τη διάρκεια του τρύγου. Η επιχείρηση οίνου μπορεί να επωφεληθεί σε μεγάλο βαθμό από τη χρήση των υγρών αποβλήτων από τα οινοποιεία για την άρδευση των αμπελώνων. Η χρήση των λυμάτων των οινοποιείων ως υποκατάστατο του αρδευτικού νερού για τους αμπελώνες θα μπορούσε να μειώσει την πίεση στους υδάτινους πόρους, καθώς το νερό γίνεται όλο και πιο σπάνιο.

Λαμβάνοντας υπόψη τις υπάρχουσες πληροφορίες γίνεται φανερό ότι η μεταβλητότητα αποτελεί αναπόσπαστο μέρος της χρήσης αστικών λυμάτων για την άρδευση γεωργικών καλλιεργειών. Πολλοί παράγοντες συμβάλλουν στην πολυπλοκότητα. Λόγω της μεταβλητότητας της σύνθεσης του φορτίου αποβλήτων στο νερό, καθώς και του όγκου του νερού που χρησιμοποιείται για άρδευση, οι ποσότητες που εφαρμόζονται ανά μονάδα γης μπορεί να διαφέρουν σημαντικά. Εκτός από τη σύνθεση του φορτίου αποβλήτων, ο βαθμός επεξεργασίας των λυμάτων δημιουργεί επίσης μεταβλητότητα στις ποσότητες αποβλήτων που εφαρμόζονται μέσω της άρδευσης με λύματα. Οι διαφορές στα χημικά χαρακτηριστικά των εδαφών προκαλούν διαφοροποίηση στη συσσώρευση ή την εξασθένηση συγκεκριμένων στοιχείων ή ενώσεων στη ζώνη των ριζών. Κατά συνέπεια, οι μεταβολές στη χημική ή/και φυσική κατάσταση του εδάφους ως απόκριση στην άρδευση με αστικά λύματα μπορεί να διαφέρουν σημαντικά. Οι διαφορές στο κλίμα συμβάλλουν επίσης στη διακύμανση της βιωσιμότητας της άρδευσης με επεξεργασμένα αστικά λύματα. Η βροχόπτωση, ειδικότερα, παίζει σημαντικό ρόλο, δεδομένου ότι η εξασθένηση ή η συσσώρευση στοιχείων θα είναι υψηλότερη σε ξηρά κλίματα σε σύγκριση με τα κλίματα με υψηλή βροχόπτωση, όπου η έκπλυση είναι πιθανό να μειώσει τον κίνδυνο αλατότητας ή τοξικότητας. Υψηλές συγκεντρώσεις  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$  και  $\text{B}^{3+}$  καθώς και άλλα ιόντα όπως  $\text{SO}_4^{2-}$  και βαρέα μέταλλα μπορούν να βρεθούν στα επεξεργασμένα αστικά λύματα. Είναι ζωτικής σημασίας να θεσπιστούν πολιτικές, συμπεριλαμβανομένων τακτικών μελετών εδάφους και νερού, για τον περιορισμό των ζημιών, επειδή ορισμένα από αυτά τα συστατικά μπορεί να είναι επιβλαβή για τη φυσική και χημική κατάσταση του εδάφους. Η ικανότητα των φυτών να απορροφούν τις ενώσεις που παρέχονται μέσω των υγρών αποβλήτων θα διαφέρει ανάλογα με την ικανότητα του εδάφους να τις απελευθερώνει στο εδαφικό διάλυμα και την ειδική για την καλλιέργεια απορρόφηση λόγω φυσιολογικών προσαρμογών.

Ένα πλεονέκτημα της χρήσης επεξεργασμένων αστικών λυμάτων για άρδευση είναι ότι οι καλλιέργειες μπορούν να λάβουν ιχνοστοιχεία και θρεπτικά συστατικά όπως N, P και  $\text{K}^+$ . Είναι ζωτικής σημασίας η εφαρμογή ενός ολοκληρωμένου προγράμματος λίπανσης και

η τροποποίηση των επιπέδων λίπανσης σύμφωνα με την ποσότητα των θρεπτικών στοιχείων που παρέχονται μέσω των υγρών αποβλήτων, δεδομένου του κυμαινόμενου θρεπτικού φορτίου των υγρών αποβλήτων. Η καταλληλότητα των γεωργικών καλλιεργειών για άρδευση με λύματα από τους δήμους καθορίζεται επίσης από τις διαφορές στη φυσιολογική ικανότητα των φυτών να αντέχουν στο χημικό στρες, όπως η ικανότητα των αλοφύτων να αντέχουν στην αλατότητα του εδάφους. Σύμφωνα με τα προαναφερθέντα, η άρδευση με επεξεργασμένα αστικά λύματα μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικές διακυμάνσεις στις παραμέτρους παραγωγής των γεωργικών καλλιεργειών, όπως η βιομάζα, η απόδοση και η ποιότητα των προϊόντων. Η διαχείριση της άρδευσης με αστικά λύματα πρέπει να προσαρμόζεται σε κάθε συνδυασμό καλλιεργειών, τύπο εδάφους, κλίμα και ποιότητα νερού, προκειμένου να διασφαλιστεί η βιώσιμη παραγωγή καλλιεργειών. Διαφορετικά, η αξιοποίηση των επεξεργασμένων αστικών λυμάτων για μακροπρόθεσμα οφέλη απαιτεί μια ολοκληρωμένη προσέγγιση.

Οι νομοθέτες, ωστόσο, δεν έχουν γνώση για την ακριβή ποιότητα των υγρών αποβλήτων οινοποιείου που θα μπορούσαν να εγκριθούν για χρήση στην άρδευση αμπελώνων υπό συγκεκριμένες συνθήκες, προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν οι επιπτώσεις στο έδαφος και οι αντιδράσεις των αμπελιών. Η πλειονότητα των δεδομένων που έχουν παραχθεί σχετικά με τα λύματα έχει προέλθει από μελέτες που έχουν διεξαχθεί σε εργαστήρια με τη χρήση πραγματικών ή προσομοιωμένων λυμάτων από πόλεις. Επομένως, απαιτείται περισσότερη έρευνα σε πραγματικούς αμπελώνες όπου τα υγρά απόβλητα των οινοποιείων εφαρμόζονται σε αμπελώνες για μεγάλο χρονικό διάστημα. Τα οινοποιεία πρέπει να καταγράφουν την προβλεπόμενη χρήση των υγρών αποβλήτων τους στο Τμήμα Υδάτων και Υγιεινής σύμφωνα με τις απαιτήσεις της Νότιας Αφρικής. Κάθε εβδομάδα, πρέπει να παρακολουθούν πόσα υγρά απόβλητα ποτίζονται.

Τέλος, απαιτείται μηνιαία αξιολόγηση της ποιότητας των υγρών αποβλήτων του οινοποιείου. Κατά τη δημιουργία των εβδομαδιαίων ισοζυγίων νερού θα πρέπει να ζητείται η γνώμη ενός εδαφολόγου. Κατά την επιλογή της καλλιέργειας που θα αρδευτεί με λύματα οινοποιείου, θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη παράγοντες όπως η σύσταση του εδάφους, το κλίμα και η ποσότητα και η ποιότητα των λυμάτων. Η μέτρηση των χημικών αντιδράσεων του εδάφους στα υγρά απόβλητα των οινοποιείων κάθε τρεις μήνες είναι ζωτικής σημασίας.

## Βιβλιογραφία

- Alisawi, H. A. O. (2020). Performance of wastewater treatment during variable temperature. *Applied Water Science*, 10(4), 89.
- Almuktar, S. A., Abed, S. N., & Scholz, M. (2018). Wetlands for wastewater treatment and subsequent recycling of treated effluent: a review. *Environmental Science and Pollution Research*, 25, 23595–23623.
- Andreottola, G., Foladori, P., & Ziglio, G. (2009). Biological treatment of winery wastewater: an overview. *Water Science and Technology*, 60(5), 1117–1125.
- Arienzo, M., Christen, E. W., Quayle, W., & Kumar, A. (2009). A review of the fate of potassium in the soil–plant system after land application of wastewaters. *Journal of Hazardous Materials*, 164(2–3), 415–422.
- Baker, P., & Hinze, C. (2007). Winery wastewater treatment for vineyard irrigation re-use. *Australian and New Zealand Grapegrower and Winemaker*, 521, 41–45.
- Barbera, A. C., Maucieri, C., Cavallaro, V., Ioppolo, A., & Spagna, G. (2013). Effects of spreading olive mill wastewater on soil properties and crops, a review. *Agricultural Water Management*, 119, 43–53.
- Basset Olivé, N. (2015). A contribution to resource recovery from wastewater. Anaerobic processes for organic matter and nitrogen treatment (Doctoral thesis, Barcelona: University of Barcelona).
- Bharathiraja, B., Iyyappan, J., Jayamuthunagai, J., Kumar, R. P., Sirohi, R., Gnansounou, E., & Pandey, A. (2020). Critical review on bioconversion of winery wastes into value-added products. *Industrial Crops and Products*, 158, 112954.
- Bolognesi, S., Cecconet, D., & Capodaglio, A. G. (2020). Agro-industrial wastewater treatment in microbial fuel cells. In *Integrated microbial fuel cells for wastewater treatment* (pp. 93–133). Elsevier.
- Bolzonella, D., Papa, M., Da Ros, C., Anga Muthukumar, L., & Rosso, D. (2019). Winery wastewater treatment: a critical overview of advanced biological processes. *Critical Reviews in Biotechnology*, 39(4), 489–507.
- Bories, A., & Sire, Y. (2010). Impacts of winemaking methods on wastewaters and their treatment. *South African Journal of Enology and Viticulture*, 31(1), 38–44.
- Bories, A., Guillot, J.-M., Sire, Y., Couderc, M., Lemaire, S.-A., Kreim, V., & Roux, J.-C. (2007). Prevention of volatile fatty acids production and limitation of odours from winery wastewaters by denitrification. *Water Research*, 41(13), 2987–2995.

- Buelow, M. C., Steenwerth, K., Silva, L. C. R., & Parikh, S. J. (2015). Characterization of winery wastewater for reuse in California. *American Journal of Enology and Viticulture*, 66(3), 302–310.
- Chapman, D. M., Matthews, M. A., & Guinard, J.-X. (2004). Sensory attributes of Cabernet Sauvignon wines made from vines with different crop yields. *American Journal of Enology and Viticulture*, 55(4), 325–334.
- Chiriaco, M. V., Belli, C., Chiti, T., Trotta, C., & Sabbatini, S. (2019). The potential carbon neutrality of sustainable viticulture showed through a comprehensive assessment of the greenhouse gas (GHG) budget of wine production. *Journal of Cleaner Production*, 225, 435–450.
- Christ, K. L., & Burritt, R. L. (2013). Environmental management accounting: the significance of contingent variables for adoption. *Journal of Cleaner Production*, 41, 163–173.
- Collivignarelli MC, Abbà A, Frattarola A, Carnevale Miino M, Padovani S, Katsoyiannis I, Torretta V. Legislation for the Reuse of Biosolids on Agricultural Land in Europe: Overview. *Sustainability*. 2019; 11(21):6015. <https://doi.org/10.3390/su11216015>
- Conradie, A. (2015). Influence of winemaking practices on the chemical characteristics of winery wastewater and the water usages of wineries (Doctoral dissertation, Stellenbosch: Stellenbosch University)..
- Day, D. V. (2011). Integrative perspectives on longitudinal investigations of leader development: From childhood through adulthood. *The Leadership Quarterly*, 22(3), 561–571.
- der Watt, J. G. (2012). Identity, ethics, and ethos in the New Testament (Vol. 141). Walter de Gruyter.
- Dutta, A., Davies, C., & Ikumi, D. S. (2018). Performance of upflow anaerobic sludge blanket (UASB) reactor and other anaerobic reactor configurations for wastewater treatment: a comparative review and critical updates. *Journal of Water Supply: Research and Technology—AQUA*, 67(8), 858–884.
- EC. (2024). Integrated Approaches for Sustainable European Wine Production. URL: <https://cordis.europa.eu/project/id/218472/reporting> Accessed 06/10/2024.
- Eusebio, A., Petruccioli, M., Lageiro, M., Federici, F., & Duarte, J. C. (2004). Microbial characterisation of activated sludge in jet-loop bioreactors treating winery wastewaters. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, 31(1), 29–34.

- Ganesh, R., Rajinikanth, R., Thanikal, J. V., Ramanujam, R. A., & Torrijos, M. (2010). Anaerobic treatment of winery wastewater in fixed bed reactors. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 33, 619–628.
- Grismer, M. E., Carr, M. A., & Shepherd, H. L. (2003). Evaluation of constructed wetland treatment performance for winery wastewater. *Water Environment Research*, 75(5), 412–421.
- Hassanli, A. M., Javan, M., & Saadat, Y. (2008). Reuse of municipal effluent with drip irrigation and evaluation the effect on soil properties in a semi-arid area. *Environmental Monitoring and Assessment*, 144, 151–158.
- Howell, C. L., & Myburgh, P. A. (2018). Management of winery wastewater by re-using it for crop irrigation-A review. *South African Journal of Enology and Viticulture*, 39(1), 116–131.
- Ioannou, L. A., Puma, G. L., & Fatta-Kassinos, D. (2015). Treatment of winery wastewater by physicochemical, biological and advanced processes: A review. *Journal of Hazardous Materials*, 286, 343–368.
- Jackson, D. I., & Lombard, P. B. (1993). Environmental and management practices affecting grape composition and wine quality-a review. *American Journal of Enology and Viticulture*, 44(4), 409–430.
- Johnson, M. B., & Mehrvar, M. (2020). Winery wastewater management and treatment in the Niagara Region of Ontario, Canada: A review and analysis of current regional practices and treatment performance. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 98(1), 5–24.
- Kalyuzhnyi, S. V., Gladchenko, M. A., Sklyar, V. I., Kurakova, O. V., & Shcherbakov, S. S. (2000). The UASB treatment of winery wastewater under submesophilic and psychrophilic conditions. *Environmental Technology*, 21(8), 919–925.
- Khan, N., Khan, M. D., Sabir, S., Nizami, A.-S., Anwer, A. H., Rehan, M., & ZainKhan, M. (2020). Deciphering the effects of temperature on bio-methane generation through anaerobic digestion. *Environmental Science and Pollution Research*, 27, 29766–29777.
- Kriel, C., & Pott, R. W. M. (2020). Quantification of resveratrol in different parts of solid pinotage winery waste: Investigating the variance between consecutive harvests. *South African Journal of Enology and Viticulture*, 41(1), 121–127.



- Kyzas, G. Z., Symeonidou, M. P., & Matis, K. A. (2016). Technologies of winery wastewater treatment: a critical approach. *Desalination and Water Treatment*, 57(8), 3372–3386.
- Laing, M. (2016). Investigating the performance of a novel Anaerobic Sequencing Batch Reactor (AnSBR) and optimisation of operational parameters to treat synthetic winery wastewater (Doctoral dissertation, Stellenbosch: Stellenbosch University).
- Laurenson, S., Bolan, N. S., Smith, E., & McCarthy, M. (2012). Use of recycled wastewater for irrigating grapevines. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 18(1), 1–10.
- Lofrano, G., & Meric, S. (2016). A comprehensive approach to winery wastewater treatment: A review of the state-of the-art. *Desalination and Water Treatment*, 57(7), 3011–3028.
- Masi, F., Rochereau, J., Troesch, S., Ruiz, I., & Soto, M. (2015). Wineries wastewater treatment by constructed wetlands: a review. *Water Science and Technology*, 71(8), 1113–1127.
- Massara, T. M., Komesli, O. T., Sozudogru, O., Komesli, S., & Katsou, E. (2017). A mini review of the techno-environmental sustainability of biological processes for the treatment of high organic content industrial wastewater streams. *Waste and Biomass Valorization*, 8, 1665–1678.
- Matthews, S. (2008). UASB technology adapted to the treatment of winery wastewater. *Water Wheel*, January/February, 20–22.
- Meena, V. S., Maurya, B. R., Verma, J. P., & Meena, R. S. (2016). Potassium solubilizing microorganisms for sustainable agriculture (Vol. 331). Springer.
- Melchior, E., & Freire, F. B. (2023). Winery Wastewater Treatment: a Systematic Review of Traditional and Emerging Technologies and Their Efficiencies. *Environmental Processes*, 10(3), 43.
- Milani, F. (2021). COVID-19 outbreak, social response, and early economic effects: a global VAR analysis of cross-country interdependencies. *Journal of Population Economics*, 34(1), 223–252.
- Mosse, K. P. M., Patti, A. F., Christen, E. W., & Cavagnaro, T. R. (2011). Winery wastewater quality and treatment options in Australia. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 17(2), 111–122.

- Mulidzi, A. R. (2007). Winery wastewater treatment by constructed wetlands and the use of treated wastewater for cash crop production. *Water Science and Technology*, 56(2), 103–109.
- Mulidzi, A. R. (2021). Evaluating Sustainable Use and Management of Winery Solid Wastes through Composting. *South African Journal of Enology and Viticulture*, 42(2), 193–200.
- Paranychianakis, N. V, Salgot, M., Snyder, S. A., & Angelakis, A. N. (2015). Water reuse in EU states: necessity for uniform criteria to mitigate human and environmental risks. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 45(13), 1409–1468.
- Pedrero, F., Kalavrouziotis, I., Alarcón, J. J., Koukoulakis, P., & Asano, T. (2010). Use of treated municipal wastewater in irrigated agriculture—Review of some practices in Spain and Greece. *Agricultural Water Management*, 97(9), 1233–1241.
- Petropoulos, E., Cuff, G., Huete, E., Garcia, G., Wade, M., Spera, D., Aloisio, L., Rochard, J., Torres, A., & Weichgrebe, D. (2016). Investigating the feasibility and the limits of high rate anaerobic winery wastewater treatment using a hybrid-EGSB bio-reactor. *Process Safety and Environmental Protection*, 102, 107–118.
- Qadir, M., Wichelns, D., Raschid-Sally, L., McCornick, P. G., Drechsel, P., Bahri, A., & Minhas, P. S. (2010). The challenges of wastewater irrigation in developing countries. *Agricultural Water Management*, 97(4), 561–568.
- Ryder, R. A. (1995). Aerobic pond treatment of winery wastewater for vineyard irrigation by drip and spray system in California. *Revue Francaise d'Oenologie (France)*.
- Shepherd, H. L., Grismer, M. E., & Tchobanoglous, G. (2001). Treatment of high-strength winery wastewater using a subsurface-flow constructed wetland. *Water Environment Research*, 73(4), 394–403.
- Sheridan, C. M. (2012). Chemical engineering modelling of a vegetated submerged reedbed for winery effluent treatment (Doctoral dissertation, University of the Witwatersrand, Faculty of Engineering and the Built Environment).
- Sparling, G. P., Wheeler, D., Vesely, E.-T., & Schipper, L. A. (2006). What is soil organic matter worth? *Journal of Environmental Quality*, 35(2), 548–557.
- Stewart, G. W. (1990). *Matrix Perturbation Theory*. Computer Science and Scientific Computing/Academic Press, Inc.

- Tarchouna, L. G., Merdy, P., Raynaud, M., Pfeifer, H.-R., & Lucas, Y. (2010). Effects of long-term irrigation with treated wastewater. Part I: Evolution of soil physico-chemical properties. *Applied Geochemistry*, 25(11), 1703–1710.
- Van Schoor, L. H. (2004). A prototype ISO 14001 environmental management system for wine cellars (Doctoral dissertation, Stellenbosch University, Private Bag).
- Vital-Jacome, M., Cazares-Granillo, M., Carrillo-Reyes, J., & Buitron, G. (2020). Characterization and anaerobic digestion of highly concentrated Mexican wine by-products and effluents. *Water Science and Technology*, 81(1), 190–198.
- Viviani, G., & Iovino, M. (2004). Wastewater reuse effects on soil hydraulic conductivity. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 130(6), 476–484.
- Vlotman, D. E., Key, D., & Bladergroen, B. J. (2022). Technological advances in winery wastewater treatment: A comprehensive review. *South African Journal of Enology and Viticulture*, 43(1), 58–80.
- Vogeler, I., Rogasik, J., Funder, U., Panten, K., & Schnug, E. (2009). Effect of tillage systems and P-fertilization on soil physical and chemical properties, crop yield and nutrient uptake. *Soil and Tillage Research*, 103(1), 137–143.
- Welz, P. J., Holtman, G., Haldenwang, R., & le Roes-Hill, M. (2016). Characterisation of winery wastewater from continuous flow settling basins and waste stabilisation ponds over the course of 1 year: Implications for biological wastewater treatment and land application. *Water Science and Technology*, 74(9), 2036–2050.
- Wolmarans, B., & De Villiers, G. H. (2002). Start-up of a UASB effluent treatment plant on distillery wastewater. *Water SA*, 28(1), 63–68.