



Μ.Π.Σ.: ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ (ΔΙΑ)

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΣΥΜΒΟΥΛΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΚΑΛΑΒΡΟΥΖΙΩΤΗΣ ΙΩΑΝΝΗΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΟΝ ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ: ΚΑΡΑΠΑΝΑΓΙΩΤΗ ΧΡΥΣΗ ΚΑΣΣΙΑΝΗ

«Χρήση υπολειμμάτων βύνης για την επεξεργασία υγρών αποβλήτων ζυθοποιίας»

«Use of malt spent grains for the treatment of brewery wastewater»

ΠΑΡΤΟΓΛΟΥ ΣΟΦΙΑ

A.M.: 166830

e-mail: std166830@ac.eap.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η βιομηχανία ζυθοποιίας αποτελεί έναν από τους πιο ανεπτυγμένους κλάδους της βιομηχανίας τροφίμων και ποτών, ωστόσο η παραγωγική διαδικασία συνδέεται με σημαντική παραγωγή υγρών και στερεών αποβλήτων. Τα υγρά απόβλητα ζυθοποιίας χαρακτηρίζονται από υψηλό οργανικό φορτίο, αυξημένες τιμές COD και BOD₅, μεταβλητό pH και παρουσία οργανικών ενώσεων, γεγονός που καθιστά απαραίτητη την κατάλληλη επεξεργασία τους πριν από τη διάθεση στο περιβάλλον (Choi, 2016). Παράλληλα, τα στερεά υποπροϊόντα της ζυθοποιίας, και κυρίως τα υπολείμματα βύνης (Brewer's Spent Grain – BSG), παράγονται σε μεγάλες ποσότητες και αξιοποιούνται κατά κύριο λόγο ως ζωοτροφή, χωρίς να αξιοποιείται επαρκώς το περιβαλλοντικό και τεχνολογικό τους δυναμικό (Jackowski et al., 2020).

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση της δυνατότητας αξιοποίησης των υπολειμμάτων βύνης για την επεξεργασία υγρών αποβλήτων ζυθοποιίας, στο πλαίσιο της βιώσιμης διαχείρισης αποβλήτων και της κυκλικής οικονομίας, όπου τα υποπροϊόντα αντιμετωπίζονται ως δευτερογενείς πόροι και όχι ως απόβλητα (Kirchherr et al., 2017). Η μεθοδολογία της εργασίας βασίζεται σε συστηματική βιβλιογραφική ανασκόπηση και σύνθεση της διαθέσιμης επιστημονικής γνώσης σχετικά με (α) τα χαρακτηριστικά των υγρών αποβλήτων ζυθοποιίας, (β) τη φυσικοχημική σύσταση και δομή του BSG και (γ) τους μηχανισμούς απομάκρυνσης ρύπων (π.χ. προσρόφηση, ιοντοανταλλαγή και επιφανειακές αλληλεπιδράσεις) που καθιστούν το BSG υποψήφιο βιοϋλικό επεξεργασίας (Su et al., 2021).

Η βιβλιογραφική σύνθεση καταδεικνύει ότι το BSG, λόγω της λιγνοκυτταρινούχας δομής και της παρουσίας λειτουργικών ομάδων, μπορεί να εμφανίζει σημαντική ικανότητα δέσμευσης οργανικών ρύπων και ιόντων μετάλλων, ιδιαίτερα όταν υφίσταται κατάλληλη τροποποίηση ή μετατροπή σε βιοάνθρακα/ενεργό άνθρακα (Chetrariu & Dabija, 2020). Ωστόσο, αναδεικνύεται επίσης ότι η αποτελεσματικότητα επηρεάζεται από παραμέτρους όπως pH, δοσολογία, χρόνος επαφής, καθώς και από τη μεταβλητότητα των πραγματικών αποβλήτων, γεγονός που απαιτεί προσοχή ως προς τη γενίκευση αποτελεσμάτων εργαστηριακής κλίμακας (Su et al., 2021). Συνολικά, η εργασία τεκμηριώνει ότι η αξιοποίηση BSG μπορεί να

συμβάλει σε πιο βιώσιμες πρακτικές επεξεργασίας υγρών αποβλήτων ζυθοποιίας, ενισχύοντας μία ολοκληρωμένη προσέγγιση κυκλικής διαχείρισης αποβλήτων.

ABSTRACT

The brewing industry is one of the most established sectors within the food and beverage industry; however, beer production is directly associated with the generation of considerable quantities of liquid and solid waste streams. Brewery wastewater is typically characterized by high organic load, elevated COD and BOD₅ values, variable pH, and the presence of organic compounds, making appropriate treatment necessary prior to discharge into the environment (Choi, 2016). At the same time, major solid by-products, particularly brewer's spent grain (BSG), are produced in large amounts and are utilized as animal feed, while their environmental and technological potential remains underexploited (Jackowski et al., 2020).

The aim of this Master's dissertation is to investigate the potential use of malt spent grains (brewer's spent grain) for the treatment of brewery wastewater, within the broader context of sustainable waste management and circular economy principles, which promote the valorization of by-products as secondary resources (Kirchherr et al., 2017). The study follows a structured literature review methodology and provides a critical synthesis of scientific evidence regarding (a) the physicochemical characteristics of brewery wastewater, (b) the composition, structure and functional properties of BSG, and (c) the mechanisms through which BSG may contribute to pollutant removal, including adsorption, ion exchange and surface interactions (Su et al., 2021).

The literature review indicates that BSG, due to its lignocellulosic matrix and the presence of functional groups, can demonstrate considerable adsorption capacity for organic pollutants and metal ions, especially when subjected to modification processes or converted into biochar/activated carbon forms (Chetrariu & Dabija, 2020). Nevertheless, the reported efficiency depends strongly on operational parameters such as pH, sorbent dosage and contact time, while the variability of industrial wastewater can limit the direct transferability of laboratory-scale results (Su et al., 2021). Overall, the dissertation supports the conclusion that BSG valorization can provide a promising, low-cost, and environmentally friendly pathway for improving brewery wastewater

treatment, contributing to an integrated circular approach for managing both solid and liquid waste streams of the brewing sector.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	3
ABSTRACT	4
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ	5
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ	9
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ	10
ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ / ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ	11
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ	12
1.1 Γενικό πλαίσιο και περιβαλλοντικές προκλήσεις των υγρών αποβλήτων	12
1.2 Η βιομηχανία ζυθοποιίας και η παραγωγή υγρών αποβλήτων	12
1.3 Σκοπός και στόχοι της διπλωματικής εργασίας	13
1.4 Ερευνητικά ερωτήματα	14
1.5 Καινοτομία και συμβολή της εργασίας	15
1.6 Προτεινόμενη μεθοδολογία και μεθοδολογικές παραδοχές	16
1.7 Προσδοκώμενα αποτελέσματα	16
1.8 Περιορισμοί της εργασίας	16
1.9 Δομή της διπλωματικής εργασίας	17
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ – ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΣΥΘΕΣΗ...	17
2.1 Διαδικασία ζυθοποίησης και ρεύματα αποβλήτων	17
2.1.1 Βασικά στάδια παραγωγής	18

2.1.2 Σημεία δημιουργίας υγρών αποβλήτων	20
2.1.3 Σύνδεση με κυκλική αξιοποίηση αποβλήτων	22
2.2 Χαρακτηριστικά υγρών αποβλήτων ζυθοποιίας (BWW)	23
2.2.1 Φυσικοχημικά χαρακτηριστικά	23
2.2.2 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις & κανονιστικό πλαίσιο	26
2.2.3 Μεταβλητότητα σύστασης	31
2.3 Υφιστάμενες τεχνολογίες επεξεργασίας BWW.....	33
2.3.1 Φυσικές μέθοδοι	33
2.3.2 Χημικές μέθοδοι	34
2.3.3 Βιολογικές μέθοδοι	35
2.3.4 Προχωρημένες τεχνολογίες	35
2.3.5 Συγκριτική αποτίμηση	36
2.4 Υπολείμματα βύνης (BSG): παραγωγή και χαρακτηριστικά	37
2.4.1 Παραγωγή BSG	37
2.4.2 Χημική σύσταση και δομή	38
2.4.3 Ιδιότητες σχετικές με προσρόφηση	40
2.5 Απόβλητα ως πόρος: κυκλική οικονομία.....	41
2.5.1 Προσέγγιση circular economy στη βιομηχανία τροφίμων/ποτών	42
2.5.2 Οικολογικά και οικονομικά οφέλη αξιοποίησης BSG	43
2.6 Μηχανισμοί απομάκρυνσης ρύπων με χρήση BSG	44
2.6.1 Προσρόφηση και ιοντοανταλλαγή	45
2.6.2 Επιφανειακές λειτουργικές ομάδες και προσροφητικές αλληλεπιδράσεις	46

2.6.3 Παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση (pH, χρόνος, θερμοκρασία κ.λπ.).....	47
2.7 Τροποποιημένο BSG και βελτίωση απόδοσης	49
2.7.1 Χημικές και θερμικές τροποποιήσεις BSG	50
2.7.2 Παραγωγή biochar από BSG	51
2.7.3 Παραγωγή ενεργού άνθρακα από BSG	52
2.7.4 Σύνθετα υλικά και νανοϋλικά με βάση BSG	52
2.8 Ερευνητικές εφαρμογές BSG στην επεξεργασία υγρών αποβλήτων	53
2.8.1 Απομάκρυνση οργανικού φορτίου (COD/BOD)	54
2.8.2 Απομάκρυνση βαρέων μετάλλων	54
2.8.3 Απομάκρυνση χρωστικών/φαινολικών ενώσεων	55
2.8.4 Συγκριτική σύνθεση και αξιολόγηση μελετών (πίνακας μελετών)	56
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗΣ ΑΝΑΣΚΕΨΗΣ.....	58
3.1 Ερευνητικός σχεδιασμός	58
3.2 Βάσεις δεδομένων και πηγές αναζήτησης	58
3.3 Λέξεις-κλειδιά και στρατηγική αναζήτησης	59
3.4 Κριτήρια ένταξης και αποκλεισμού	60
3.5 Διαδικασία επιλογής μελετών (flow diagram)	62
3.6 Μέθοδος ανάλυσης δεδομένων	63
3.7 Αξιοπιστία και περιορισμοί	63
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ.....	64
4.1 Κατηγοριοποίηση μελετών	64
4.2 Αποτελεσματικότητα BSG στην απομάκρυνση ρύπων	65

4.3 Σύγκριση raw BSG – modified – biochar – ενεργού άνθρακα	65
4.4 Παράγοντες που επηρεάζουν την αποδοτικότητα	67
4.5 Εφαρμογή BSG σταBWW.....	67
4.6 Εφικτότητα εφαρμογής σε πραγματικές συνθήκες (scale-up)	72
4.7 Σύγκριση με άλλες τεχνολογίες επεξεργασίας	73
4.8 Συνολική αποτίμηση βάσει βιωσιμότητας & circular economy	73
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ	73
5.1 Συμπεράσματα ανά ερευνητικό ερώτημα	73
5.2 Συμβολή της εργασίας	75
5.3 Περιορισμοί	75
5.4 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα	76
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	78
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ	81
Παράρτημα Α: Πίνακας σύνοψης ερευνητικών μελετών	81
Παράρτημα Β: Search strings / βάσεις δεδομένων	83
Παράρτημα Γ: Συμπληρωματικά σχήματα	84

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2.1 Πηγές υγρών αποβλήτων ζυθοποιίας και χαρακτηριστικά ρύπανσης.....	22
Πίνακας 2.2 Φυσικοχημικά χαρακτηριστικά υγρών αποβλήτων ζυθοποιίας(BWW)..	24
Πίνακας 2.3 Ενδεικτικά όρια εκροής υγρών αποβλήτων σε αποδέκτες.....	30
Πίνακας 2.4 Συγκριτική παρουσίαση τεχνολογιών επεξεργασίας BWW	37
Πίνακας 2.5 Χημική σύσταση και βασικά χαρακτηριστικά του BSG	39
Πίνακας 2.6 Παράγοντες που επηρεάζουν την προσρόφηση ρύπων από BSG.....	48
Πίνακας 2.7 Σύγκριση raw BSG έναντι τροποποιημένου BSG/biochar/ενεργού άνθρακα	53
Πίνακας 2.8 Σύνοψη ερευνητικών μελετών εφαρμογής BSG σε επεξεργασία αποβλήτων.....	57
Πίνακας 3.1 Βάσεις δεδομένων και στρατηγική αναζήτησης	59
Πίνακας 3.2 Κριτήρια ένταξης/αποκλεισμού μελετών	61
Πίνακας 4.1 Ομαδοποίηση μελετών ανά τύπο υλικού.....	64
Πίνακας 4.2 Σύγκριση αποδοτικότητας απομάκρυνσης ρύπων με διαφορετικές μορφές BSG	68
Πίνακας 4.3 Συγκριτική αξιολόγηση απόδοσης και εφαρμοσιμότητας σε πραγματικές συνθήκες ζυθοποιίας	72
Πίνακας A.1: Σύνοψη ερευνητικών μελετών εφαρμογής υπολειμμάτων βύνης (BSG) και παραγώγων τους στην επεξεργασία υγρών αποβλήτων.....	82
Πίνακας B.1: Βάσεις δεδομένων, λέξεις-κλειδιά και συνδυασμοί αναζήτησης που χρησιμοποιήθηκαν στη βιβλιογραφική ανασκόπηση.....	83

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 2.1 Διάγραμμα σταδίων ζυθοποίησης και σημείων παραγωγής υγρών αποβλήτων	21
Σχήμα 2.2 Δομή/σύσταση του BSG (cellulose/hemicellulose/lignin/proteins)	38
Σχήμα 2.3 Εννοιολογικό διάγραμμα μηχανισμών προσρόφησης ρύπων από BSG ...	45
Σχήμα 2.4 Διαδρομές τροποποίησης BSG (chemical treatment → biochar → activated carbon)	50
Σχήμα 3.1 Ροή επιλογής βιβλιογραφίας (PRISMA-like flow diagram)	62
Σχήμα 4.1 Συγκριτικό γράφημα αποδόσεων απομάκρυνσης ρύπων	66
Σχήμα 4.2 Εννοιολογική ένταξη του BSG σε σύστημα επεξεργασίας υγρών αποβλήτων ζυθοποιίας	70
Σχήμα 5.1 Συνοπτικό μοντέλο αξιοποίησης BSG για βιώσιμη επεξεργασία αποβλήτων (circular economy model)	76
Σχήμα Γ.1. Ενδεικτική σχηματική απεικόνιση λιγνοκυτταρινούχας δομής υπολειμμάτων βύνης (BSG).....	85
Σχήμα Γ.2. Σχηματική απεικόνιση επιφανειακών αλληλεπιδράσεων μεταξύ BSG και ρύπων.....	85
Σχήμα Γ.3. Εναλλακτικές διαδρομές αξιοποίησης BSG στο πλαίσιο κυκλικής οικονομίας	86
Σχήμα Γ.4. Σχηματική σύγκριση εργαστηριακής και πιλοτικής/βιομηχανικής εφαρμογής BSG.....	86
Σχήμα Γ.5.Συνοπτικό διάγραμμα σύνδεσης στερεών και υγρών αποβλήτων ζυθοποιίας.....	87

ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ / ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ

- AOPs – Advanced Oxidation Processes (Προχωρημένες Οξειδωτικές Διεργασίες)
- BOD – Biochemical Oxygen Demand (Βιοχημικά Απαιτούμενο Οξυγόνο)
- BOD₅ – Biochemical Oxygen Demand (5 days) (Βιοχημικά Απαιτούμενο Οξυγόνο 5 ημερών)
- BSG – Brewer’s Spent Grain (Υπολείμματα Βύνης Ζυθοποιίας)
- BWW – Brewery Wastewater (Υγρά Απόβλητα Ζυθοποιίας)
- COD – Chemical Oxygen Demand (Χημικά Απαιτούμενο Οξυγόνο)
- DO – Dissolved Oxygen (Διαλυμένο Οξυγόνο)
- EC – Electrical Conductivity (Ηλεκτρική Αγωγιμότητα)
- EPS – Extracellular Polymeric Substances (Εξωκυτταρικές Πολυμερικές Ουσίες)
- HRT – Hydraulic Retention Time (Υδραυλικός Χρόνος Παραμονής)
- LCA – Life Cycle Assessment (Ανάλυση Κύκλου Ζωής)
- MBBR – Moving Bed Biofilm Reactor (Αντιδραστήρας Βιοφίλμ Κινούμενης Κλίνης)
- MBR – Membrane Bioreactor (Βιοαντιδραστήρας Μεμβρανών)
- NH₄⁺ – Ammonium (Αμμώνιο)
- NO₃⁻ – Nitrate (Νιτρικά)
- N/P – Nitrogen/Phosphorus (Άζωτο/Φώσφορος)
- O&G – Oils and Grease (Έλαια και Λίπη)
- pH – Potential of Hydrogen (Δείκτης Οξύτητας)
- PRISMA – Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses
- SS – Suspended Solids (Αιωρούμενα Στερεά)
- TDS – Total Dissolved Solids (Ολικά Διαλυμένα Στερεά)
- TKN – Total Kjeldahl Nitrogen (Ολικό Άζωτο Kjeldahl)
- TN – Total Nitrogen (Ολικό Άζωτο)
- TP – Total Phosphorus (Ολικός Φώσφορος)
- TSS – Total Suspended Solids (Ολικά Αιωρούμενα Στερεά)
- UASB – Upflow Anaerobic Sludge Blanket (Ανοδική Αναερόβια Κλίνη Ιλύος)
- UV – Ultraviolet (Υπεριώδης Ακτινοβολία)
- WWTP – Wastewater Treatment Plant (Μονάδα Επεξεργασίας Λυμάτων)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Γενικό πλαίσιο και περιβαλλοντικές προκλήσεις των υγρών αποβλήτων

Η παραγωγή και διάθεση υγρών αποβλήτων αποτελεί ένα από τα πλέον κρίσιμα ζητήματα της περιβαλλοντικής διαχείρισης, ιδιαίτερα σε βιομηχανικούς κλάδους με αυξημένη κατανάλωση νερού και υψηλό οργανικό φορτίο. Η ανεπαρκής επεξεργασία υγρών αποβλήτων δύναται να προκαλέσει σημαντικές επιπτώσεις στους υδάτινους αποδέκτες, όπως μείωση του διαλυμένου οξυγόνου, αύξηση του οργανικού φορτίου, μεταβολές στο pH, ανάπτυξη οσμών και υποβάθμιση της οικολογικής ισορροπίας, οδηγώντας σε επιτάχυνση διεργασιών ευτροφισμού και γενικότερη μείωση της ποιότητας των υδατικών οικοσυστημάτων (Choi, 2016).

Στο πλαίσιο της αυξανόμενης περιβαλλοντικής ευαισθητοποίησης και της αυστηροποίησης των κανονιστικών πλαισίων, η αποτελεσματική επεξεργασία υγρών αποβλήτων έχει μετατραπεί σε αναγκαία συνθήκη όχι μόνο για συμμόρφωση, αλλά και για τη βελτίωση της περιβαλλοντικής επίδοσης των βιομηχανιών. Η σύγχρονη προσέγγιση δίνει έμφαση στην ολοκληρωμένη διαχείριση αποβλήτων, όπου οι βιομηχανίες καλούνται να εφαρμόσουν τεχνικές μείωσης αποβλήτων στην πηγή, ανάκτησης πόρων, καθώς και στρατηγικές επαναχρησιμοποίησης, όπου είναι εφικτό (Kirchherr et al., 2017).

Ιδιαίτερη σημασία αποκτά η αρχή της κυκλικής οικονομίας, σύμφωνα με την οποία τα απόβλητα δεν θεωρούνται τελικό «υπόλειμμα», αλλά δυνητικά επαναξιοποιήσιμος πόρος. Έτσι, αναπτύσσεται ένα νέο ερευνητικό και τεχνολογικό ενδιαφέρον για λύσεις χαμηλού κόστους και υψηλής περιβαλλοντικής αξίας, που ενσωματώνουν βιοϋλικά και παραπροϊόντα στη διαδικασία επεξεργασίας αποβλήτων (Kirchherr et al., 2017).

1.2 Η βιομηχανία ζυθοποιίας και η παραγωγή υγρών αποβλήτων

Η βιομηχανία ζυθοποιίας αποτελεί έναν από τους πιο ανεπτυγμένους κλάδους της βιομηχανίας τροφίμων και ποτών διεθνώς, με υψηλή παραγωγική δυναμικότητα και σημαντική συμβολή στην οικονομία πολλών χωρών. Η παραγωγή μπίρας είναι ιδιαίτερα διαδεδομένη παγκοσμίως και βασίζεται σε διαδοχικά στάδια επεξεργασίας πρώτων υλών, όπως βυνοποίηση, άλεση, πολτοποίηση (mashing), διαχωρισμός

γλεύκους από στερεά (lautering), βρασμός με λυκίσκο, ψύξη, ζύμωση, ωρίμανση και συσκευασία (Jackowski et al., 2020; Mussatto, 2014).

Ωστόσο, τα παραπάνω στάδια συνεπάγονται εκτεταμένη χρήση νερού τόσο ως βασικό συστατικό του προϊόντος όσο και για διεργασίες καθαρισμού, απολύμανσης, μεταφοράς και ψύξης. Ειδικότερα, οι διεργασίες καθαρισμού εξοπλισμού και δεξαμενών (Clean-In-Place, CIP) αποτελούν σημαντική πηγή παραγόμενων αποβλήτων, καθώς περιλαμβάνουν οργανικά υπολείμματα, καθαριστικές ουσίες και πιθανές μεταβολές στο pH (Choi, 2016).

Σύμφωνα με τη σχετική βιβλιογραφία, η ζυθοποιία μπορεί να παράγει περίπου 3 έως 10 λίτρα υγρών αποβλήτων ανά λίτρο παραγόμενης μπίρας, γεγονός που καταδεικνύει το μέγεθος του περιβαλλοντικού αποτυπώματος του κλάδου (Carnevale Miino et al., 2025). Τα υγρά απόβλητα ζυθοποιίας εμφανίζουν συνήθως υψηλό οργανικό φορτίο, με αυξημένες τιμές COD και BOD₅, παρουσία αιωρούμενων στερεών, μεταβλητό pH, καθώς και ενώσεις που προέρχονται από υπολείμματα σακχάρων, πρωτεϊνών, ζυμών και αλκοόλης (Choi, 2016; Jackowski et al., 2020).

Η μεταβλητότητα των αποβλήτων αποτελεί βασική πρόκληση, καθώς το ρυπαντικό φορτίο διαφοροποιείται ανάλογα με την τεχνολογία παραγωγής, το είδος της μπίρας, τις ποσότητες παραγωγής, τις πρακτικές καθαρισμού και το επίπεδο αυτοματοποίησης. Κατά συνέπεια, η επιλογή κατάλληλων τεχνολογιών επεξεργασίας απαιτεί καλή κατανόηση των φυσικοχημικών χαρακτηριστικών τους και ορθολογική προσαρμογή στις πραγματικές συνθήκες λειτουργίας (Enitan et al., 2015).

1.3 Σκοπός και στόχοι της διπλωματικής εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως στόχο τη διερεύνηση της δυνατότητας αξιοποίησης των υπολειμμάτων βύνης (Brewer's Spent Grain – BSG), ενός από τα σημαντικότερα στερεά υποπροϊόντα της βιομηχανίας ζύθου, για την επεξεργασία υγρών αποβλήτων ζυθοποιίας. Η εργασία εντάσσεται στη λογική της βιώσιμης διαχείρισης αποβλήτων και της κυκλικής οικονομίας, καθώς εξετάζει την επαναχρησιμοποίηση ενός στερεού βιομηχανικού υπολείμματος με σκοπό τη μείωση της περιβαλλοντικής επιβάρυνσης και τη βελτίωση της ποιότητας των υδατικών αποδεκτών (Kirchherr et al., 2017).

Ο σκοπός της διπλωματικής είναι η συστηματική βιβλιογραφική ανασκόπηση και αξιολόγηση της επιστημονικής γνώσης που αφορά:

- (α) τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά των υγρών αποβλήτων ζυθοποιίας,
- (β) τη δομή, σύσταση και επιφανειακές ιδιότητες των υπολειμμάτων βύνης, και
- (γ) τη σχέση των χαρακτηριστικών αυτών με τη δυνατότητα απομάκρυνσης ρύπων μέσω διεργασιών όπως προσρόφιση, ιοντοανταλλαγή ή συνδυαστικές τεχνικές επεξεργασίας (Su et al., 2021).

Επιμέρους στόχοι

Για την επίτευξη του σκοπού, τίθενται οι ακόλουθοι επιμέρους στόχοι (όπως αναφέρονται και στη φόρμα της εργασίας):

- Καταγραφή και ανάλυση των κύριων χαρακτηριστικών των υγρών αποβλήτων ζυθοποιίας με έμφαση σε COD, BODs, pH, αιωρούμενα στερεά και χρώμα (Choi, 2016).
- Η προέλευση, η σύνθεση και οι φυσικοχημικές ιδιότητες του BSG παρουσιάζονται, με έμφαση στη λιγνοκυτταρινούχα δομή, πρωτεΐνες και λειτουργικές ομάδες (Mussatto, 2014).
- Εξετάζει τους βασικούς μηχανισμούς της αφαίρεσης ρύπων (φυσική/χημική προσρόφιση, ιοντοανταλλαγή, επιφανειακές αλληλεπιδράσεις) (Su et al., 2021).
- Έρευνα για την αποτελεσματικότητα της χρήσης του BSG όπως παρουσιάζεται στη βιβλιογραφία σχετικά με τη μείωση των οργανικών φορτίων και άλλων δεικτών ρύπανσης (Chetrariu & Dabija, 2020).

1.4 Ερευνητικά ερωτήματα

Με βάση τα παραπάνω, η διπλωματική εργασία στοχεύει να απαντήσει στα ακόλουθα ερευνητικά ερωτήματα:

1. Ποιες είναι οι κύριες ποιοτικές και ποσοτικές χαρακτηριστικές ιδιότητες των αποβλήτων της ζυθοποιίας και ποιες παράμετροι επηρεάζουν τη μεταβλητότά τους; (Choi, 2016; Enitan et al., 2015)

2. Τι συνθέτει τη διαμόρφωση και την φυσικοχημική σύσταση του BSG και ποια από τα χαρακτηριστικά του σχετίζονται με την ικανότητα για εξάλειψη των ρύπων; (Mussatto, 2014)
3. Ποιοι μηχανισμοί προσρόφησης και επιφανειακών αλληλεπιδράσεων επιτρέπουν την αξιοποίηση του BSG ως βιοϋλικό επεξεργασίας; (Su et al., 2021)
4. Πόσο αποτελεσματικό είναι το ακατέργαστο και τροποποιημένο BSG (π.χ. biochar/activated carbon) στην επεξεργασία υγρών αποβλήτων και σε ποιες συνθήκες εμφανίζει βέλτιστη συμπεριφορά; (Chetrariu & Dabija, 2020; Gomez-Delgado et al., 2025)
5. Ποιοι παράγοντες περιορίζουν την εφαρμογή της προσέγγισης σε πραγματικές συνθήκες ζυθοποιίας και ποιες κατευθύνσεις έρευνας απαιτούνται για κλιμάκωση; (Su et al., 2021).

1.5 Καινοτομία και συμβολή της εργασίας

Το στοιχείο καινοτομίας της παρούσας εργασίας έγκειται στη συνθετική αντιμετώπιση της διαχείρισης δύο σημαντικών ρευμάτων αποβλήτων της ζυθοποιίας (στερεών και υγρών). Συγκεκριμένα, η εργασία προσεγγίζει τα υπολείμματα βύνης όχι ως απόβλητο αλλά ως δευτερογενή πρώτη ύλη, εξετάζοντας τη δυνατότητα αξιοποίησής τους για την επεξεργασία υγρών αποβλήτων της ίδιας βιομηχανικής δραστηριότητας (Kirchherr et al., 2017).

Παρότι το BSG έχει μελετηθεί κυρίως ως ζωοτροφή ή ως πρώτη ύλη για ενεργειακή αξιοποίηση, το επιστημονικό ενδιαφέρον έχει στραφεί τα τελευταία χρόνια σε εφαρμογές περιβαλλοντικής τεχνολογίας, όπως η χρήση του ως προσροφητικό υλικό ή η μετατροπή του σε ενεργούς άνθρακες (Chetrariu & Dabija, 2020; Gomez-Delgado et al., 2025). Επομένως, η εργασία φιλοδοξεί να συμβάλει:

- στη συγκεντρωτική και κριτική παρουσίαση των διαθέσιμων ερευνητικών δεδομένων,
- στη συσχέτιση φυσικοχημικών χαρακτηριστικών BSG με αποδοτικότητα απομάκρυνσης ρύπων,

- στην ανάδειξη των προϋποθέσεων για εφαρμογή σε πραγματικές συνθήκες.

1.6 Προτεινόμενη μεθοδολογία και μεθοδολογικές παραδοχές

Η παρούσα μελέτη ακολουθεί βιβλιογραφική μεθοδολογία, με αναζήτηση και αξιολόγηση επιστημονικών πηγών που σχετίζονται με: brewery wastewater treatment, brewer's spent grain, adsorption, biosorbents, biochar και circular economy. Η ανασκόπηση βασίζεται στην ανάλυση διεθνών επιστημονικών άρθρων (peer-reviewed), επιλεγμένων βιβλίων και αξιόπιστων επιστημονικών πηγών, με έμφαση στη μεθοδολογική εγκυρότητα και στη συνάφεια των αποτελεσμάτων προς το αντικείμενο της διπλωματικής.

1.7 Προσδοκώμενα αποτελέσματα / συμπεράσματα

Παρότι η εργασία δεν περιλαμβάνει πειραματική διερεύνηση, η βιβλιογραφική σύνθεση αναμένεται να καταδείξει:

- ότι το BSG εμφανίζει σημαντικές δυνατότητες προσρόφησης οργανικών και ανόργανων ρύπων, ιδιαίτερα μετά από τροποποίηση ή μετατροπή σε βιοάνθρακα/ενεργό άνθρακα (Su et al., 2021; Gomez-Delgado et al., 2025),
- ότι η αποτελεσματικότητα εξαρτάται έντονα από παραμέτρους λειτουργίας (pH, χρόνος επαφής, δοσολογία, αρχική συγκέντρωση ρύπων),
- ότι απαιτείται προσοχή στη μεταφορά αποτελεσμάτων από εργαστηριακή σε βιομηχανική κλίμακα λόγω μεταβλητότητας πραγματικών αποβλήτων (Su et al., 2021).

1.8 Περιορισμοί της εργασίας

Η παρούσα διατριβή είναι βιβλιογραφική ανασκόπηση — δεν περιλαμβάνει πειραματικό μέρος. Τα συμπεράσματα προκύπτουν από δεδομένα προηγούμενων ερευνών, οι οποίες όμως έχουν διαφορετικές πειραματικές συνθήκες, διάφορες μορφές BSG (raw/modified) και διαφορετικούς τύπους αποβλήτων. Η κλιμάκωση σε βιομηχανικές συνθήκες χρειάζεται επιπλέον έρευνα και αξιολόγηση (Su et al., 2021).

1.9 Δομή της διπλωματικής εργασίας

Η διπλωματική εργασία, αποτελείται από πέντε κεφάλαια:

Στο Κεφάλαιο 1 δίνεται το εισαγωγικό πλαίσιο — ο προβληματισμός, το ακαδημαϊκό κενό, ο σκοπός, τα ερευνητικά ερωτήματα, η μεθοδολογία, οι περιορισμοί και η συνολική δομή.

Στο Κεφάλαιο 2 αναπτύσσεται το θεωρητικό υπόβαθρο και γίνεται η βιβλιογραφική σύνθεση γύρω από (α) τα υγρά απόβλητα ζυθοποιίας, (β) τα υπολείμματα βύνης, και (γ) τις εφαρμογές του BSG στην επεξεργασία υγρών αποβλήτων μέσω προσρόφησης/τροποποιήσεων (Mussatto, 2014; Jackowski et al., 2020).

Στο Κεφάλαιο 3 περιγράφεται αναλυτικά η μεθοδολογία της βιβλιογραφικής αναζήτησης — ποιες βάσεις δεδομένων χρησιμοποιήθηκαν, και ποια κριτήρια οδήγησαν στην επιλογή και αξιολόγηση των πηγών.

Στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζονται και συζητούνται τα βιβλιογραφικά ευρήματα. Ομαδοποιούνται οι μελέτες ανά προσέγγιση (raw BSG, modified BSG, biochar/activated carbon) και γίνεται συγκριτική αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας.

Στο Κεφάλαιο 5 παρατίθενται τα συνολικά συμπεράσματα, η συμβολή της εργασίας στη διαχείριση αποβλήτων ζυθοποιίας και προτείνονται κατευθύνσεις για μελλοντική έρευνα και εφαρμογές.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ – ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΣΥΝΘΕΣΗ

2.1 Διαδικασία ζυθοποίησης και ρεύματα αποβλήτων

Η παραγωγή μπίρας αποτελεί μία πολύπλοκη βιομηχανική διεργασία που συνδυάζει θερμικές, ενζυμικές και μικροβιακές μετατροπές οργανικής ύλης. Από περιβαλλοντική σκοπιά, η διαδικασία ζυθοποίησης δεν είναι μόνο μια τεχνολογία τροφίμων, αλλά ένα σύστημα μετατροπής φυτικής βιομάζας σε προϊόν και ταυτόχρονα σε πολλαπλά ρεύματα αποβλήτων, τα οποία διαφέρουν ως προς τη φυσικοχημική σύσταση, το οργανικό φορτίο και τη συμπεριφορά τους κατά την επεξεργασία (Mussatto, 2014; Jackowski et al., 2020).

Η κατανόηση της παραγωγικής αλυσίδας είναι κρίσιμη για την περιβαλλοντική διαχείριση, διότι κάθε στάδιο παραγωγής συνδέεται με συγκεκριμένους τύπους ρύπων και διαφορετική μορφή οργανικής ύλης (διαλυμένη ή αιωρούμενη). Τα υγρά απόβλητα ζυθοποιίας (BWW) χαρακτηρίζονται γενικά από υψηλές συγκεντρώσεις COD και BOD₅, παρουσία αιωρούμενων στερεών και έντονες διακυμάνσεις pH, ιδιότητες που προκύπτουν άμεσα από τη φύση των διεργασιών ζυθοποίησης και των διαδικασιών καθαρισμού (Choi, 2016).

Παράλληλα, η διεργασία παράγει μεγάλες ποσότητες στερεών υποπροϊόντων, με κυριότερο το Brewer's Spent Grain (BSG). Το στοιχείο αυτό έχει ιδιαίτερη σημασία στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, καθώς πρόκειται για υλικό που προκύπτει από την ίδια παραγωγική διεργασία η οποία δημιουργεί τα υγρά απόβλητα, ανοίγοντας τον δρόμο για ενδοβιομηχανική αξιοποίηση αποβλήτων στο πλαίσιο της κυκλικής οικονομίας.

2.1.1 Βασικά στάδια παραγωγής

Η ζυθοποίηση αποτελεί αλληλουχία διεργασιών κατά τις οποίες το άμυλο της βύνης μετατρέπεται σε ζυμώσιμα σάκχαρα και στη συνέχεια σε αιθανόλη. Τα στάδια κατά τη διαδικασία της ζυθοποίησης είναι τα ακόλουθα κατά σειρά ακολουθίας:

(https://www.eurekaheights.com/how-is-beer-made-complete-guide-to-beer-brewing/?utm_source=chatgpt.com)

1. Βυνοποίηση (Malting)

Το κριθάρι βρέχεται και φυτρώνει ελαφρά ώστε να ενεργοποιηθούν ένζυμα, που θα μετατρέψουν το άμυλο σε σάκχαρα.

2. Άλεσμα βύνης (Milling)

Η βύνη σπάει σε μικρά κομμάτια, για να μπορούν να εξαχθούν τα σάκχαρα (C₆H₁₂O₆) στο επόμενο στάδιο.

3. Πολτοποίηση (Mashing)

Η άλεσμένη βύνη αναμιγνύεται με ζεστό νερό, ώστε τα ένζυμα να μετατρέψουν τα άμυλα σε ζυμώσιμα σάκχαρα.

4. Διαχωρισμός γλεύκους (Lautering)

Το υγρό (γλεύκος) διαχωρίζεται από τα στερεά υπολείμματα της βύνης.

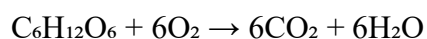
5. Βρασμός (Boiling)
Το γλεύκος βράζει και προστίθεται ο λυκίσκος για πικράδα, άρωμα και αποστείρωση.
6. Καθίζηση & Ψύξη (Whirlpool & Cooling)
Αφαιρούνται στερεά υπολείμματα και το υγρό ψύχεται γρήγορα για να ξεκινήσει η ζύμωση.
7. Ζύμωση (Fermentation)
Προστίθεται μαγιά που μετατρέπει τα σάκχαρα σε αιθανόλη (C₂H₅OH) και διοξείδιο του άνθρακα (CO₂).
8. Ωρίμανση (Conditioning / Lagering)
Η μπίρα αφήνεται να ωριμάσει ώστε να σταθεροποιηθεί η γεύση και να καθαρίσει.
9. Φιλτράρισμα (Filtering – προαιρετικό) - Διαύγαση
Αφαιρούνται αιωρούμενα σωματίδια για πιο καθαρή εμφάνιση.
10. Συσκευασία (Packaging) – Εμφιάλωση / Βαρελοποίηση
Η μπίρα συσκευάζεται σε μπουκάλια, κουτάκια ή βαρέλια για κατανάλωση.

Στο σημείο αυτό να αναφέρουμε πως τα στάδια της βυνοποίησης και της πολτοποίησης χαρακτηρίζονται με τον όρο της «σελάσματος», λόγω της δράσης των ενζύμων να διασπών τα κυτταρικά τοιχώματα του σπόρου, που προκαλεί την απελευθέρωση του αμύλου ώστε να μετατραπεί σε σάκχαρα.

Από περιβαλλοντική άποψη, κάθε στάδιο χαρακτηρίζεται από συγκεκριμένες ροές μάζας και διαφορετική συμβολή στο οργανικό φορτίο των αποβλήτων. Ακόλουθα αναφέρονται οι εκροές κατά τα πιο σημαντικά στάδια.

➤ Άλεση και πολτοποίηση

Κατά την πολτοποίηση λαμβάνει χώρα ενζυμική υδρόλυση του αμύλου μέσω αμυλασών, οδηγώντας σε παραγωγή γλυκόζης και μαλτόζης. Τα σάκχαρα αυτά είναι άμεσα βιοαποδομήσιμα και, όταν καταλήγουν στα απόβλητα μέσω απωλειών ή καθαρισμών, αυξάνουν σημαντικά το BOD₅, καθώς οξειδώνονται από μικροοργανισμούς:



Επομένως, το στάδιο αυτό συνδέεται με παραγωγή υγρών ρευμάτων πλούσιων σε διαλυμένη οργανική ύλη υψηλής βιοδιαθεσιμότητας.

➤ Διαχωρισμός γλεύκους – Παραγωγή BSG

Κατά τον διαχωρισμό γλεύκους από στερεά, παράγεται το BSG, υλικό πλούσιο σε κυτταρίνη, ημικυτταρίνη, λιγνίνη και πρωτεΐνες (Mussatto, 2014). Από περιβαλλοντική άποψη, το στάδιο αυτό σχετίζεται κυρίως με παραγωγή αιωρούμενων στερεών (TSS) σε περίπτωση μεταφοράς ινών ή στερεών στα απόβλητα. Το BSG αποτελεί το βασικό στερεό υπόστρωμα που εξετάζεται στην παρούσα εργασία ως προσροφητικό υλικό.

➤ Βρασμός γλεύκους

Ο βρασμός προκαλεί θερμικές αντιδράσεις και καθίζηση πρωτεϊνών. Τα υπολείμματα πρωτεϊνών και οργανικών ουσιών που απομακρύνονται μέσω καθαρισμών συμβάλλουν σε αύξηση COD και TSS.

➤ Ζύμωση και ωρίμανση

Κατά τη ζύμωση, τα σάκχαρα μετατρέπονται σε αιθανόλη:



Η αιθανόλη αποτελεί οργανική ένωση υψηλού BOD₅. Απώλειες προϊόντος ή καθαρισμοί δεξαμενών οδηγούν σε ρεύματα αποβλήτων πλούσια σε διαλυμένη οργανική ύλη.

➤ Διαύγαση, φιλτράρισμα και συσκευασία

Τα στάδια αυτά παράγουν ιζήματα μαγιάς και πρωτεϊνών, τα οποία αυξάνουν τα αιωρούμενα στερεά και επιβαρύνουν τις φυσικές διεργασίες επεξεργασίας.

2.1.2 Σημεία δημιουργίας υγρών αποβλήτων

Τα υγρά απόβλητα ζυθοποιίας δεν αποτελούν ενιαίο ρεύμα αλλά μίγμα επιμέρους ρευμάτων διαφορετικής προέλευσης. Το μεγαλύτερο ποσοστό σχετίζεται με τις διεργασίες CIP, όπου χρησιμοποιούνται αλκαλικά και όξινα διαλύματα, προκαλώντας έντονες διακυμάνσεις pH.

Οι απώλειες γλεύκους ή μπίρας αποτελούν σημαντική πηγή οργανικού φορτίου, καθώς τα σάκχαρα και η αιθανόλη οξειδώνονται βιοχημικά, αυξάνοντας τις τιμές COD και BOD₅.

Τα νερά πλύσης δαπέδων και τα βοηθητικά ρεύματα έχουν χαμηλότερη αλλά μεταβλητή επιβάρυνση, ενώ τα ρεύματα από διάγυση και φίλτρανση περιέχουν ιζήματα μαγιάς και πρωτεϊνών.

Η ανάμιξη αυτών των ρευμάτων οδηγεί σε απόβλητο με υψηλό οργανικό φορτίο, παρουσία αιωρούμενων στερεών και έντονη μεταβλητότητα, γεγονός που καθιστά αναγκαία την εφαρμογή συστημάτων εξισορρόπησης φορτίου και κατάλληλων τεχνολογιών επεξεργασίας (Choi, 2016).

Στο Σχήμα 2.1 απεικονίζονται τα βασικά στάδια της διαδικασίας ζυθοποίησης, καθώς και τα κύρια σημεία στα οποία παράγονται υγρά απόβλητα εντός της παραγωγικής αλυσίδας.

Σχήμα 2.1. Διάγραμμα σταδίων ζυθοποίησης και σημείων παραγωγής υγρών αποβλήτων



Πηγή: Προσαρμογή από Mussatto (2014), Jackowski et al. (2020) και Fillaudeau et al. (2006).

Τα BWW αποτελούν μίγμα επιμέρους ρευμάτων:

Πίνακας 2.1. Πηγές υγρών αποβλήτων ζυθοποιίας και χαρακτηριστικά ρύπανσης

Πηγή	Τύπος ρύπανσης	Περιβαλλοντική σημασία
CIP καθαρισμοί	Ακραίο pH, οργανικά υπολείμματα	Τοξικότητα, αστάθεια βιολογικών διεργασιών
Απώλειες γλεύκους/μπίρας	Σάκχαρα, αιθανόλη	Υψηλό BOD ₅
Νερά πλύσης	Απορρυπαντικά + οργανικά	Μεταβλητό COD
Διαύγαση/φίλτραση	Μαγιά, πρωτεΐνες	Αυξημένο TSS

Πηγή: Προσαρμογή από Fillaudeau et al. (2006), Enitan et al. (2015) και Choi (2016).

Η μεγάλη μεταβλητότητα στη σύσταση οφείλεται σε batch παραγωγή, διαφορετικά προϊόντα και συχνότητα καθαρισμών. Αυτό οδηγεί σε αιχμές φορτίου COD και pH, γεγονός που καθιστά απαραίτητη την εφαρμογή δεξαμενών εξισορρόπησης πριν από βιολογική επεξεργασία.

2.1.3 Σύνδεση με κυκλική αξιοποίηση αποβλήτων

Η ταυτόχρονη παραγωγή BSG και υγρών αποβλήτων από την ίδια διεργασία δημιουργεί δυνατότητα εσωτερικής αξιοποίησης αποβλήτων, όπου ένα στερεό ρεύμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως υλικό επεξεργασίας ενός υγρού ρεύματος της ίδιας βιομηχανίας. Η προσέγγιση αυτή εντάσσεται στη λογική της βιομηχανικής συμβίωσης και της κυκλικής οικονομίας, μειώνοντας τόσο το περιβαλλοντικό αποτύπωμα όσο και το κόστος διαχείρισης αποβλήτων.

2.2 Χαρακτηριστικά υγρών αποβλήτων ζυθοποιίας (Brewery Wastewater – BWW)

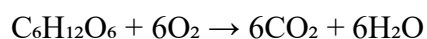
Τα υγρά απόβλητα ζυθοποιίας (Brewery Wastewater – BWW) αποτελούν ένα από τα σημαντικότερα ρεύματα αποβλήτων του κλάδου, κυρίως λόγω του μεγάλου όγκου παραγωγής τους και του υψηλού οργανικού φορτίου. Η σύστασή τους είναι γενικά πλούσια σε οργανικές ενώσεις (σάκχαρα, πρωτεΐνες, αιθανόλη), αιωρούμενα στερεά, καθώς και θρεπτικά στοιχεία όπως άζωτο και φώσφορος, τα οποία συνδέονται με κίνδυνο ευτροφισμού (Choi, 2016; Enitan et al., 2015).

Η κατανόηση των φυσικοχημικών χαρακτηριστικών των BWW είναι καθοριστική για τον κατάλληλο σχεδιασμό τεχνολογιών επεξεργασίας (βιολογικών, φυσικοχημικών ή συνδυαστικών) και την επίτευξη συμμόρφωσης με τα εκάστοτε όρια διάθεσης (Kebede, 2018; Shumbe et al., 2024).

2.2.1 Φυσικοχημικά χαρακτηριστικά (COD, BOD, TSS, pH, N, P)

Οι βασικές παράμετροι που σχετίζονται με τη ποιότητα των υγρών αποβλήτων ζυθοποιίας περιλαμβάνουν δείκτες οργανικού φορτίου, αιωρούμενων στερεών και θρεπτικών συστατικών. Η σχετική βιβλιογραφία τονίζει ότι τα BWW κατατάσσονται σε απόβλητα υψηλής οργανικής ρύπανσης, με σημαντική μεταβλητότητα που εξαρτώνται από την παραγωγική διαδικασία και τα πρωτόκολλα καθαρισμού (Choi, 2016; Enitan et al., 2015).

Από χημικοφυσική άποψη, οι δείκτες οργανικού φορτίου (COD και BOD₅) συνδέονται άμεσα με διεργασίες οξείδωσης της οργανικής ύλης. Ενδεικτικά, η πλήρης αερόβια οξείδωση ενός απλού οργανικού μορίου, όπως η γλυκόζη (C₆H₁₂O₆), μπορεί να περιγραφεί από την αντίδραση:



Αντίστοιχα, ενώσεις όπως η αιθανόλη (C₂H₅OH), που απαντώνται συχνά στα υγρά απόβλητα ζυθοποιίας λόγω απωλειών προϊόντος, συμβάλλουν σημαντικά στο

οργανικό φορτίο μέσω αντιδράσεων οξείδωσης, αυξάνοντας τις τιμές COD και BOD₅ (Kebede, 2018; Choi, 2016).

Πίνακας 2.2: Τυπικές φυσικοχημικές παράμετροι υγρών αποβλήτων ζυθοποιίας (BWW)

Παράμετρος	Τυπικό εύρος τιμών στα BWW	Ερμηνεία / Τι δείχνει
COD (mg/L)	~2.000 – 10.000+	Χημικά απαιτούμενο O ₂ : συνολικό οργανικό φορτίο
BOD ₅ (mg/L)	~1.000 – 6.000	Βιοαποδομήσιμο οργανικό φορτίο
TSS (mg/L)	~200 – 2.000	Αιωρούμενα στερεά (υπολείμματα βύνης, μαγιά)
pH	~4,0 – 12,0	Οξύτητα/αλκαλικότητα – επηρεάζεται από CIP
TN / TKN (mg/L)	~25 – 150	Ολικό άζωτο – συμβολή σε ευτροφισμό
TP (mg/L)	~5 – 50	Ολικός φώσφορος – κρίσιμος παράγοντας ευτροφισμού

Πηγές: Choi (2016); Enitan et al. (2015); Kebede (2018); Shumbe et al. (2024).

Σύντομη εξήγηση κάθε δείκτη

- COD (Chemical Oxygen Demand):

Εκφράζει την ποσότητα οξυγόνου που απαιτείται για τη χημική οξείδωση της οργανικής ύλης στο νερό. Περιλαμβάνει τόσο βιοαποδομήσιμες όσο και μη βιοαποδομήσιμες ενώσεις και αποτελεί βασικό δείκτη εκτίμησης της συνολικής ρυπαντικής φόρτισης και του απαιτούμενου βαθμού επεξεργασίας (Kebede, 2018).

- BOD₅ (Biochemical Oxygen Demand):

Αντιπροσωπεύει το βιοαποδομήσιμο κλάσμα της οργανικής ύλης, δηλαδή την ποσότητα οξυγόνου που καταναλώνεται από μικροοργανισμούς σε διάστημα 5 ημερών. Υψηλές τιμές BOD₅ σχετίζονται με έντονη κατανάλωση διαλυμένου

οξυγόνου στους αποδέκτες, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε ανοξικές συνθήκες (Choi, 2016).

- TSS (Total Suspended Solids):

Αφορά τα αιωρούμενα στερεά σωματίδια — όπως τις ίνες βύνης, τα σωματίδια πρωτεϊνών και τις ζύμες. Οι υψηλές συγκεντρώσεις TSS επηρεάζουν τη θολότητα και την ιζηματοποίηση, και μπορούν να επιβαρύνουν σημαντικά τις διεργασίες βιολογικής επεξεργασίας (Enitan et al., 2015).

- pH:

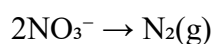
Δείκτης οξύτητας ή αλκαλικότητας των αποβλήτων. Στα ΒWW, εμφανίζεται συχνά μεγάλη διακύμανση. Οφείλεται κυρίως στη χρήση όξινων και αλκαλικών διαλυμάτων στους καθαρισμούς CIP. Ενδεικτικά, η χρήση υδροξειδίου του νατρίου (NaOH) αυξάνει το pH μέσω παραγωγής OH⁻, (π.χ. HNO₃) αυξάνουν τη συγκέντρωση H⁺. Η εξουδετέρωση μπορεί να περιγραφεί σχηματικά από την αντίδραση:



Ακραίες τιμές pH αποτελούν σοβαρή πρόκληση για τις βιολογικές διεργασίες επεξεργασίας (Choi, 2016).

- TN/TKN (Total Nitrogen / Total Kjeldahl Nitrogen):

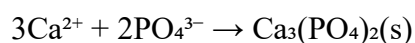
Αφορούν το ολικό άζωτο και το οργανικό/αμμωνιακό άζωτο αντίστοιχα. Το άζωτο, είναι ένα θρεπτικό στοιχείο που μπορεί να προκαλέσει ευτροφισμό. Και η απομάκρυνσή του γίνεται με διεργασίες νιτροποίησης και απονιτροποίησης, όπως:



(Shumbe et al., 2024)

- TP (Total Phosphorus):

Ο φώσφορος θεωρείται σημαντικός παράγοντας του ευτροφισμού. Σε φυσικοχημικές διεργασίες επεξεργασίας, μπορεί να απομακρυνθεί με καθίζηση — για παράδειγμα σχηματίζοντας φωσφορικό ασβέστιο:

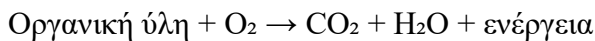


(Kebede, 2018)

2.2.2 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις και κανονιστικό πλαίσιο

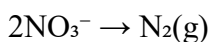
Η απόρριψη υγρών αποβλήτων ζυθοποιίας —αν δεν περάσει πρώτα από σωστή επεξεργασία— μπορεί να προκαλέσει σοβαρά περιβαλλοντικά προβλήματα εξαιτίας του μεγάλου οργανικού φορτίου.

Η αυξημένη τιμή BOD₅ συνδέεται άμεσα με την κατανάλωση διαλυμένου οξυγόνου από αερόβιους μικροοργανισμούς, οι οποίοι οξειδώνουν τη βιοαποδομήσιμη οργανική ύλη. Η διεργασία αυτή μπορεί να περιγραφεί σχηματικά από την αντίδραση:



Η υπερβολική κατανάλωση O₂ οδηγεί σε μείωση του διαλυμένου οξυγόνου στους υδάτινους αποδέκτες και έτσι προκύπτουν ανοξικές ή και αναερόβιες συνθήκες, με αποτέλεσμα θνησιμότητα υδρόβιων οργανισμών και σοβαρή διατάραξη της οικολογικής ισορροπίας (Choi, 2016).

Η παρουσία αζώτου και φωσφόρου στα υγρά απόβλητα ζυθοποιίας αυξάνει τον κίνδυνο ευτροφισμού. Από χημικοβιολογική άποψη αυτά τα θρεπτικά λειτουργούν ως περιοριστικοί παράγοντες για την ανάπτυξη φυκών και φυτοπλαγκτού. Η εισροή τους προκαλεί γρήγορη αύξηση της βιομάζας, μετά αποσύνθεση και ξανά μεγαλύτερη κατανάλωση διαλυμένου οξυγόνου. Το άζωτο ειδικά υφίσταται βιοχημικούς μετασχηματισμούς μέσω νιτροποίησης και απονιτροποίησης:



Αυτές οι διεργασίες, δεν αλλάζουν μόνο τη χημική σύσταση του νερού αλλά και το pH του — και αυτό εντείνει τις περιβαλλοντικές πιέσεις (Kebede, 2018).

Επιπλέον, η μεταβλητότητα του pH και η πιθανή παρουσία καθαριστικών χημικών από διεργασίες CIP — για παράδειγμα υδροξείδιο του νατρίου ή όξινα διαλύματα — μπορούν να φέρουν τοξικές ή απλά ακατάλληλες συνθήκες διάθεσης. Η απότομη άνοδος ή πτώση του pH ανατρέπει τη χημική ισορροπία του νερού, αλλάζει

τη μορφή και τη διαθεσιμότητα των διαλυμένων ιόντων και των οργανικών ενώσεων. Ακραίες τιμές pH μπορούν να διαταράξουν τη μικροβιακή δραστηριότητα και να μειώσουν πολύ την αποτελεσματικότητα των φυσικών ή βιολογικών διεργασιών αυτοκαθαρισμού στους αποδέκτες (Choi, 2016; Enitan et al., 2015).

Όσον αφορά το κανονιστικό πλαίσιο, η διάθεση βιομηχανικών αποβλήτων σε επιφανειακούς αποδέκτες ή σε δίκτυα αποχέτευσης πρέπει οπωσδήποτε να συμμορφώνεται με συγκεκριμένα όρια εκπομπών — συνήθως για δείκτες οργανικού φορτίου (COD, BOD₅), αιωρούμενα στερεά (TSS), pH, καθώς και για τις συγκεντρώσεις θρεπτικών στοιχείων όπως άζωτο και φώσφορος.

Οι οριακές αυτές τιμές βασίζονται σε χημικοφυσικά και οικοτοξικολογικά κριτήρια, με στόχο την προστασία των υδατικών οικοσυστημάτων και της δημόσιας υγείας. Στην πράξη, οι μονάδες ζυθοποιίας οφείλουν να εφαρμόζουν κατάλληλες τεχνολογίες επεξεργασίας, ώστε να επιτυγχάνουν συστηματική συμμόρφωση με το κανονιστικό πλαίσιο και ταυτόχρονα να μειώνουν το συνολικό περιβαλλοντικό τους αποτύπωμα (Shumbe et al., 2024).

Τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά των υγρών αποβλήτων ζυθοποιίας, όπως το υψηλό οργανικό φορτίο (COD, BOD₅), τα αιωρούμενα στερεά και οι διακυμάνσεις pH, δεν αποτελούν μόνο περιβαλλοντική πρόκληση, αλλά και παράγοντες που καθορίζουν τη συμμόρφωση των μονάδων με το ισχύον κανονιστικό πλαίσιο διάθεσης αποβλήτων. Για τον λόγο αυτό, η αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων συνδέεται άμεσα με τις νομοθετικές απαιτήσεις και τα θεσμοθετημένα όρια εκροής που διέπουν τη λειτουργία των βιομηχανικών εγκαταστάσεων.

Η διαχείριση υγρών βιομηχανικών αποβλήτων στην Ελλάδα και την Ευρωπαϊκή Ένωση διέπεται από ένα σύνολο νομοθετικών και κανονιστικών διατάξεων που αποσκοπούν στην προστασία των υδάτινων αποδεκτών και της δημόσιας υγείας. Οι ζυθοποιίες, ως μονάδες παραγωγής τροφίμων με σημαντική κατανάλωση νερού και παραγωγή οργανικού φορτίου, υπάγονται στις διατάξεις που αφορούν τη διάθεση βιομηχανικών αποβλήτων.

Ευρωπαϊκό Πλαίσιο

Σε επίπεδο ΕΕ, βασικό ρόλο διαδραματίζει:

- Η Οδηγία-Πλαίσιο για τα Ύδατα 2000/60/ΕΚ
Η οδηγία θέτει στόχο την επίτευξη «καλής κατάστασης» των υδάτων και επιβάλλει περιορισμούς στη διάθεση ρυπαντών. Τα βιομηχανικά απόβλητα με υψηλό οργανικό φορτίο (COD, BOD₅) θεωρούνται πιεστικός παράγοντας για τα επιφανειακά και υπόγεια ύδατα. (<https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2000/60/oj>)
- Η Οδηγία 91/271/ΕΟΚ για την επεξεργασία αστικών λυμάτων
Αν και αφορά κυρίως αστικά λύματα, καθορίζει όρια εκροής για COD, BOD₅ και αιωρούμενα στερεά, τα οποία εφαρμόζονται και σε βιομηχανικές εκροές που διοχετεύονται σε δημοτικά δίκτυα. (<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX%3A01991L0271-20140101>)
-
- Η Οδηγία για τις Βιομηχανικές Εκπομπές 2010/75/ΕΕ (IED)
Εισάγει την αρχή των Βέλτιστων Διαθέσιμων Τεχνικών (BAT). Για τη βιομηχανία τροφίμων, συμπεριλαμβανομένης της ζυθοποιίας, τα BAT περιλαμβάνουν μέτρα μείωσης οργανικού φορτίου και εξοικονόμησης νερού. (<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX%3A02010L0075-20110106>)

Εθνικό Πλαίσιο (Ελλάδα)

Στην Ελλάδα, η διάθεση υγρών βιομηχανικών αποβλήτων ρυθμίζεται από:

- ΚΥΑ 5673/400/1997 σχετικά με μέτρα και όρους για τη διάθεση υγρών αποβλήτων
- Ν. 4014/2011 για την περιβαλλοντική αδειοδότηση έργων και δραστηριοτήτων

- Τοπικές αποφάσεις Περιφερειών που καθορίζουν όρια διάθεσης COD, BOD₅, TSS και pH σε επιφανειακούς αποδέκτες ή αποχετευτικά δίκτυα.

Οι ζυθοποιίες οφείλουν να διαθέτουν εγκεκριμένους περιβαλλοντικούς όρους και να παρακολουθούν συστηματικά την ποιότητα εκροής.

Ρόλος του Γενικού Χημείου του Κράτους

Το Γενικό Χημείο του Κράτους (ΓΧΚ) λειτουργεί ως αρμόδιος φορέας ελέγχου της ποιότητας υδάτων και των αναλυτικών μεθόδων προσδιορισμού ρύπων. Οι αναλύσεις COD, BOD₅, pH και αιωρούμενων στερεών πραγματοποιούνται σύμφωνα με τυποποιημένες μεθόδους που αναγνωρίζονται από το ΓΧΚ.

Πρότυπα ISO

Οι βιομηχανίες τροφίμων εφαρμόζουν συχνά:

- ISO 14001 – Σύστημα Περιβαλλοντικής Διαχείρισης
- ISO 22000 – Ασφάλεια τροφίμων
- ISO 5667 – Δειγματοληψία υδάτων

Τα πρότυπα αυτά ενισχύουν τον έλεγχο και την ιχνηλασιμότητα της περιβαλλοντικής απόδοσης.

Η εφαρμογή του BSG ως προσροφητικού υλικού εντάσσεται στο πλαίσιο των BAT και της κυκλικής οικονομίας, καθώς συμβάλλει στη μείωση του οργανικού φορτίου των αποβλήτων και στην επαναξιοποίηση υποπροϊόντων, διευκολύνοντας τη συμμόρφωση των ζυθοποιιών με τα νομοθετικά όρια εκροής.

Πίνακας 2.3. Ενδεικτικά όρια εκροής υγρών αποβλήτων σε αποδέκτες

Παράμετρος	Μονάδα	Τυπικά όρια διάθεσης σε επιφανειακό αποδέκτη	Όρια για διάθεση σε δημοτικό αποχετευτικό δίκτυο	Περιβαλλοντική σημασία
COD	mg/L	125–250	500–1000	Δείκτης ολικού οργανικού φορτίου
BOD ₅	mg/L	25–40	250–500	Βιοαποδομήσιμο οργανικό φορτίο
TSS (Αιωρούμενα στερεά)	mg/L	35–60	350–600	Φραγή φίλτρων, θολότητα αποδεκτών
pH	–	6.0–9.0	6.0–9.5	Προστασία βιολογικών διεργασιών
Θερμοκρασία	°C	< 30	< 35	Προστασία μικροοργανισμών
Ολικά άζωτο (TN)	mg/L	10–15	40–70	Ευτροφισμός
Ολικός φώσφορος (TP)	mg/L	1–2	8–15	Ευτροφισμός

Πηγή: Προσαρμογή από ΚΥΑ 5673/400/1997, Ν. 4014/2011 και προδιαγραφές ΔΕΥΑ για διάθεση σε δημοτικά αποχετευτικά δίκτυα (τα όρια βασίζονται σε συνδυασμό ευρωπαϊκών οδηγιών, εθνικής νομοθεσίας και πρακτικών περιβαλλοντικών όρων αδειοδότησης βιομηχανιών τροφίμων).

Τα υγρά απόβλητα ζυθοποιίας συχνά εμφανίζουν τιμές COD που υπερβαίνουν τα 2.000–6.000 mg/L και BOD₅ άνω των 1.000 mg/L, τιμές πολλαπλάσιες των επιτρεπόμενων ορίων εκροής. Η μεγάλη αυτή απόκλιση καθιστά απαραίτητη την εφαρμογή σταδίων επεξεργασίας πριν από τη διάθεση σε αποδέκτη ή αποχετευτικό δίκτυο.

Η εφαρμογή προσροφητικών υλικών όπως το BSG μπορεί να συμβάλει στη μείωση αιχμών οργανικού φορτίου και αιωρούμενων στερεών, διευκολύνοντας τη συμμόρφωση με τα θεσμοθετημένα όρια και τη σταθερότερη λειτουργία των βιολογικών μονάδων επεξεργασίας.

Σύνδεση με τις Βέλτιστες Διαθέσιμες Τεχνικές (BAT)

Σύμφωνα με την Οδηγία για τις Βιομηχανικές Εκπομπές (2010/75/EE), οι βιομηχανικές εγκαταστάσεις οφείλουν να εφαρμόζουν τις Βέλτιστες Διαθέσιμες Τεχνικές (Best Available Techniques – BAT), με στόχο τη μείωση των εκπομπών και της κατανάλωσης πόρων. Για τη βιομηχανία τροφίμων και ποτών, στις BAT περιλαμβάνονται:

- η μείωση του οργανικού φορτίου των αποβλήτων στην πηγή
- η ανάκτηση και αξιοποίηση υποπροϊόντων
- η εξισορρόπηση φορτίου πριν από βιολογική επεξεργασία
- η εφαρμογή φυσικοχημικών σταδίων προεπεξεργασίας όπου απαιτείται

Η αξιοποίηση του Brewer's Spent Grain ως προσροφητικού υλικού εντάσσεται λειτουργικά στο πλαίσιο των BAT, καθώς συνδυάζει δύο βασικές αρχές: (α) εσωτερική αξιοποίηση υποπροϊόντος της παραγωγικής διεργασίας και (β) μείωση ρυπαντικού φορτίου πριν από το κύριο στάδιο επεξεργασίας.

Με τον τρόπο αυτό, η χρήση BSG δεν αποτελεί μόνο τεχνική επιλογή, αλλά και πρακτική που ευθυγραμμίζεται με τις ευρωπαϊκές κατευθυντήριες γραμμές για την περιβαλλοντική απόδοση των βιομηχανικών εγκαταστάσεων. Επιπλέον, η προσέγγιση αυτή συνδέεται με τις αρχές της κυκλικής οικονομίας, καθώς ένα στερεό ρεύμα αποβλήτου αξιοποιείται για τη βελτίωση της διαχείρισης ενός υγρού ρεύματος της ίδιας μονάδας.

2.2.3 Μεταβλητότητα σύστασης και λειτουργικοί παράγοντες

Η σύνθεση των υγρών αποβλήτων ζυθοποιίας δεν είναι σταθερή, αλλά εξαρτάται από πλήθος τεχνικών και λειτουργικών παραμέτρων που επηρεάζουν τόσο το οργανικό φορτίο όσο και τη χημική ισορροπία του αποβλήτου. Η βιβλιογραφία λέει ότι τα BWW παρουσιάζουν σημαντικές μεταβολές στις τιμές COD και BOD₅, καθώς και στο pH. Και αυτό, δυσκολεύει την εφαρμογή ενιαίων, «πάντα σωστών» λύσεων επεξεργασίας (Choi, 2016; Enitan et al., 2015).

Χημικοφυσικά τώρα, αυτές οι μεταβολές συνδέονται με αλλαγές στη συγκέντρωση και στη μορφή της οργανικής ύλης —διαλυμένη ή αιωρούμενη—, αλλά και με τη διαθεσιμότητα θρεπτικών στοιχείων και την ποσότητα ανόργανων ιόντων. Για παράδειγμα, όταν υπάρχουν αυξημένες απώλειες προϊόντος ή γλεύκους, βλέπουμε υψηλές συγκεντρώσεις ζυμώσιμων σακχάρων και αιθανόλης. Αυτά ανεβάζουν πολύ το COD και το BOD₅. Και όταν γίνονται έντονοι κύκλοι καθαρισμού, αλλάζει το pH και η ιοντική ισορροπία του αποβλήτου.

Οι κύριοι παράγοντες που καθορίζουν αυτή τη μεταβλητότητα είναι:

- Μέγεθος/τύπος ζυθοποιίας (βιομηχανική vs μικροζυθοποιία): Σε μεγάλες μονάδες τα φορτία τείνουν να είναι πιο ομογενοποιημένα, επειδή η λειτουργία είναι συνεχής. Στις μικροζυθοποιίες, όμως, εμφανίζονται έντονες διακυμάνσεις στις συγκεντρώσεις οργανικών ενώσεων και στο pH —λόγω ασυνεχούς παραγωγής και περιοδικών καθαρισμών.
- Τύπος προϊόντος: Διάφορες συνταγές μπίρας —όπως εκείνες με υψηλή περιεκτικότητα σε σάκχαρα ή πρωτεΐνες— επηρεάζουν τη σύσταση του αποβλήτου. Έτσι αυξάνεται η συγκέντρωση συγκεκριμένων οργανικών ενώσεων που συνεισφέρουν στο συνολικό οργανικό φορτίο (COD/BOD₅).
- Συχνότητα και μέθοδος καθαρισμού (CIP): Αυτός είναι ίσως ο πιο καθοριστικός παράγοντας για το pH και τη χημική επιβάρυνση. Η χρήση αλκαλικών διαλυμάτων — π.χ. NaOH— μπορεί να δώσει έντονα αλκαλικό pH, ενώ οι όξινοι καθαρισμοί προκαλούν απότομη πτώση του pH. Οι μεταβολές αυτές επηρεάζουν τη μορφή των ιόντων και τη σταθερότητα των οργανικών ενώσεων, με αποτέλεσμα να δυσκολεύεται η βιολογική επεξεργασία.
- Απώλειες πρώτων υλών ή προϊόντος: Όταν μπαίνει μπίρα ή γλεύκος στα απόβλητα, οι συγκεντρώσεις διαλυμένης οργανικής ύλης ανεβαίνουν απότομα —γι' αυτό βλέπουμε αιχμές στο COD και στο BOD₅— και αυξάνεται η κατανάλωση οξυγόνου στη βιολογική επεξεργασία.
- Εποχικότητα και ρυθμός παραγωγής: Οι διακυμάνσεις στην παραγωγή αλλάζουν και τον όγκο και τη συγκέντρωση ρύπων. Οδηγούν σε μη σταθερά φορτία εισόδου στις

μονάδες επεξεργασίας, οπότε απαιτείται ευελιξία στον σχεδιασμό (Kebede, 2018; Shumbe et al., 2024).

Συμπερασματικά, λοιπόν, η κατανόηση της μεταβλητότητας της σύστασης των ΒWW είναι κρίσιμο στοιχείο για να σχεδιαστούν κατάλληλα συστήματα επεξεργασίας.

Στην πράξη, συχνά απαιτείται εφαρμογή δεξαμενών εξισορρόπησης φορτίου (equalisation), προεπεξεργασία ή συνδυασμός τεχνολογιών, ώστε να εξομαλύνονται οι διακυμάνσεις συγκέντρωσης και pH και να διασφαλίζεται σταθερή και αποδοτική λειτουργία των διεργασιών επεξεργασίας (Shumbe et al., 2024).

2.3 Υφιστάμενες τεχνολογίες επεξεργασίας υγρών αποβλήτων ζυθοποιίας

Η επεξεργασία των υγρών αποβλήτων ζυθοποιίας (Brewery Wastewater – ΒWW) είναι ένα περίπλοκο τεχνικό θέμα. Έχουν πολύ υψηλό οργανικό φορτίο, η σύσταση αλλάζει συνεχώς και υπάρχουν και θρεπτικά στοιχεία μέσα. Στη διεθνή βιβλιογραφία έχουν παρουσιαστεί διάφορες τεχνολογίες: φυσικές, χημικές, βιολογικές και πιο προχωρημένες ή συνδυαστικές διεργασίες, ανάλογα με το πώς αφαιρούνται οι ρύποι (Kebede, 2018; Shumbe et al., 2024).

Η επιλογή της σωστής τεχνολογίας εξαρτάται από τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά των ΒWW — COD, BOD₅, pH, TSS, N, P — και από τον επιθυμητό βαθμό καθαρισμού. Επίσης μετρώνε οι κανονιστικές απαιτήσεις και, φυσικά, τα οικονομικά της λειτουργίας.

2.3.1 Φυσικές μέθοδοι επεξεργασίας

Οι φυσικές μέθοδοι επεξεργασίας βασίζονται σε μηχανιστικούς διαχωρισμούς και φυσικά φαινόμενα, χωρίς τη χρήση χημικών αντιδραστηρίων ή τη συμμετοχή μικροοργανισμών. Συνήθως εφαρμόζονται ως προεπεξεργασία, με στόχο τη μείωση των αιωρούμενων στερεών και την προστασία των επόμενων σταδίων επεξεργασίας (Kebede, 2018).

Οι βασικότερες φυσικές διεργασίες περιλαμβάνουν:

- Εσχάρωση και κοσκίνιση, για την απομάκρυνση μεγάλων στερεών σωματιδίων (π.χ. ίνες βύνης).
- Καθίζηση, όπου τα σωματίδια υψηλότερης πυκνότητας απομακρύνονται λόγω βαρύτητας.
- Επίπλευση (π.χ. DAF – Dissolved Air Flotation), κατά την οποία μικροφουσαλίδες αέρα προσκολλώνται σε σωματίδια και τα μεταφέρουν στην επιφάνεια.

Από χημικοφυσική άποψη, οι διεργασίες αυτές δεν μεταβάλλουν τη χημική σύσταση της οργανικής ύλης, αλλά μειώνουν κυρίως το φορτίο TSS και μέρος του COD που συνδέεται με αιωρούμενα στερεά. Ωστόσο, το διαλυμένο οργανικό φορτίο (διαλυμένα σάκχαρα, αιθανόλη) παραμένει σε μεγάλο βαθμό ανεπηρέαστο, καθιστώντας αναγκαία τη συνδυαστική εφαρμογή με άλλες τεχνολογίες (Enitan et al., 2015).

2.3.2 Χημικές μέθοδοι επεξεργασίας

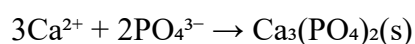
Οι χημικές μέθοδοι επεξεργασίας στοχεύουν στην απομάκρυνση ρύπων μέσω χημικών αντιδράσεων, όπως καθίζηση, εξουδετέρωση, οξείδωση ή συσσωμάτωση. Στα BWW εφαρμόζονται κυρίως για τη μείωση θρεπτικών στοιχείων, αιωρούμενων στερεών και σε ορισμένες περιπτώσεις του οργανικού φορτίου (Kebede, 2018).

Τυπικές χημικές διεργασίες περιλαμβάνουν:

- Εξουδετέρωση pH, με χρήση οξέων ή βάσεων:



- Χημική καθίζηση φωσφόρου, μέσω προσθήκης αλάτων ασβεστίου ή σιδήρου, π.χ.:



- Κροκίδωση, με χρήση FeCl_3 ή $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, που οδηγεί σε απομάκρυνση κολλοειδών και μέρους του COD.

Αν και οι χημικές μέθοδοι είναι αποτελεσματικές και ταχείες, παρουσιάζουν μειονεκτήματα, όπως αυξημένο λειτουργικό κόστος, παραγωγή χημικής ύλης και περιορισμένη αποτελεσματικότητα στην απομάκρυνση διαλυμένου βιοαποδομήσιμου οργανικού φορτίου (Carnevale Miino et al., 2025).

2.3.3 Βιολογικές μέθοδοι επεξεργασίας

Οι βιολογικές διεργασίες είναι η βασική τεχνολογία για την επεξεργασία των υγρών αποβλήτων της ζυθοποιίας — κυρίως επειδή η οργανική ύλη που έχουν διασπάται εύκολα. Βασίζονται στην εργασία μικροοργανισμών που οξειδώνουν την οργανική ύλη και τη μετατρέπουν σε CO₂, H₂O και βιομάζα (Choi, 2016).

Η αερόβια βιολογική αποδόμηση μπορεί να περιγραφεί σχηματικά ως:

Οργανική ύλη + O₂ → CO₂ + H₂O + βιομάζα

Οι συνηθέστερες βιολογικές τεχνολογίες περιλαμβάνουν:

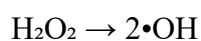
- Ενεργό ιλύ,
- SBR (Sequencing Batch Reactors),
- MBBR (Moving Bed Biofilm Reactors),
- UASB (αναερόβιες διεργασίες) για υψηλά φορτία COD.

Από χημικοφυσική σκοπιά, οι αναερόβιες διεργασίες μετατρέπουν την οργανική ύλη σε μεθάνιο (CH₄) και CO₂, μέσα από σειρά βιοχημικών σταδίων και δίνουν ενεργειακά οφέλη. Όμως, χρειάζονται αυστηρό έλεγχο του pH και της θερμοκρασίας, και συχνά ακολουθούνται από αερόβια επεξεργασία (Shumbe et al., 2024).

2.3.4 Προχωρημένες τεχνολογίες (AOPs, μεμβράνες κ.λπ.)

Οι προχωρημένες τεχνολογίες επεξεργασίας στοχεύουν κυρίως στην απομάκρυνση υπολειμματικών ρύπων ή στη βελτίωση της ποιότητας εκροής. Περιλαμβάνουν:

- Προχωρημένες οξειδωτικές διεργασίες (AOPs), όπως O_3 , UV/ H_2O_2 , Fenton, που βασίζονται στη δημιουργία ριζών υδροξυλίου ($\bullet OH$):



- Μεμβρανικές διεργασίες (UF, NF, RO), που επιτυγχάνουν φυσικό διαχωρισμό διαλυμένων ουσιών.

Αυτές οι τεχνολογίες αποδίδουν καλά, αλλά έχουν και την άλλη όψη. Έχουν υψηλό ενεργειακό κόστος, χρειάζονται προεπεξεργασία και δεν εφαρμόζονται εύκολα σε μεγάλες παροχές BWW, όπως σημειώνει ο Kebede (2018).

2.3.5 Συγκριτική αποτίμηση τεχνολογιών (πλεονεκτήματα / μειονεκτήματα)

Συνοψίζοντας, καμία μεμονωμένη τεχνολογία δεν επαρκεί από μόνη της για την πλήρη επεξεργασία των υγρών αποβλήτων ζυθοποιίας. Οι φυσικές και χημικές μέθοδοι είναι αποτελεσματικές ως προεπεξεργασία, οι βιολογικές διεργασίες αποτελούν τον κορμό της επεξεργασίας, ενώ οι προχωρημένες τεχνολογίες εφαρμόζονται επικουρικά.

Η σύγχρονη ερευνητική τάση στρέφεται προς ολοκληρωμένες και κυκλικές προσεγγίσεις, όπου συνδυάζονται τεχνολογίες επεξεργασίας με αξιοποίηση υποπροϊόντων, όπως τα υπολείμματα βύνης (BSG), με στόχο τη μείωση κόστους, την ανάκτηση πόρων και τη συνολική βελτίωση της περιβαλλοντικής απόδοσης (Kirchherr et al., 2017; Su et al., 2021).

Στον Πίνακα 2.4 παρουσιάζεται συνοπτικά συγκριτική αποτίμηση των κυριότερων τεχνολογιών επεξεργασίας υγρών αποβλήτων ζυθοποιίας, με έμφαση στα βασικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματά τους.

Πίνακας 2.4. Συγκριτική παρουσίαση τεχνολογιών επεξεργασίας BWW

Τεχνολογία	Κύριος μηχανισμός	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Φυσικές μέθοδοι (εσχάρωση, καθίζηση, DAF)	Μηχανικός διαχωρισμός	Απλή λειτουργία, χαμηλό κόστος	Δεν απομακρύνουν διαλυμένο COD
Χημικές μέθοδοι (κροκίδωση, καθίζηση)	Χημική αντίδραση	Υψηλή απομάκρυνση TSS, P	Παραγωγή ιλύος, κόστος χημικών
Αερόβια βιολογική επεξεργασία	Μικροβιακή οξείδωση	Υψηλή μείωση BOD ₅	Ενεργειακό κόστος
Αναερόβια διεργασία (UASB)	Μετατροπή COD σε CH ₄	Παραγωγή ενέργειας	Αστάθεια σε μεταβολές pH
AOPs	Ρίζες •OH	Απομάκρυνση ανθεκτικών ρύπων	Υψηλό κόστος
Μεμβράνες	Φυσικός διαχωρισμός	Πολύ καλή ποιότητα εκροής	Fouling, κόστος

Πηγή: Προσαρμογή από Fillaudeau et al. (2006), Henze et al. (2008), Metcalf & Eddy (2014) και Miklos et al. (2018).

2.4 Υπολείμματα βύνης (Brewer's Spent Grain – BSG): παραγωγή και χαρακτηριστικά

Τα υπολείμματα βύνης (Brewer's Spent Grain – BSG) αποτελούν το κυριότερο στερεό υποπροϊόν της βιομηχανίας ζυθοποιίας και προκύπτουν κατά το στάδιο του διαχωρισμού του γλεύκους από τα στερεά κλάσματα της βύνης (lautering). Από περιβαλλοντική και τεχνολογική άποψη, το BSG παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον, καθώς παράγεται σε μεγάλες ποσότητες και χαρακτηρίζεται από πλούσια λιγνοκυτταρινούχα δομή και παρουσία λειτουργικών ομάδων, που δύνανται να αξιοποιηθούν σε διεργασίες επεξεργασίας υγρών αποβλήτων (Mussatto, 2014; Jackowski et al., 2020).

2.4.1 Παραγωγή BSG και διαθέσιμες ποσότητες

Το BSG παράγεται κατά το στάδιο του lautering, όπου το υδατικό εκχύλισμα της πολτοποιημένης βύνης (γλεύκος) διαχωρίζεται από τα αδιάλυτα στερεά συστατικά. Τα στερεά αυτά αποτελούνται κυρίως από φλοιούς κριθαριού και μη υδρολυμένα κυτταρικά συστατικά, τα οποία παραμένουν μετά την ενζυμική υδρόλυση του αμύλου (Mussatto, 2014).

Ποσοτικά, το BSG αντιστοιχεί περίπου στο 85% των συνολικών στερεών υποπροϊόντων της ζυθοποιίας και παράγεται σε αναλογία περίπου 18–20 kg (υγρού BSG) ανά 100 L παραγόμενης μπίρας. Σε υγρή μορφή, το BSG παρουσιάζει υψηλή υγρασία (70–80% w/w), γεγονός που δυσχεραίνει την αποθήκευση και μεταφορά του και περιορίζει τις συμβατικές εφαρμογές του (Jackowski et al., 2020).

Η μεγάλη διαθεσιμότητα του BSG σε συνδυασμό με το χαμηλό ή μηδενικό οικονομικό κόστος διάθεσης καθιστούν το υλικό ιδιαίτερα ελκυστικό για εφαρμογές περιβαλλοντικής τεχνολογίας, στο πλαίσιο της κυκλικής οικονομίας και της ανάκτησης πόρων από απόβλητα (Kirchherr et al., 2017).

2.4.2 Χημική σύσταση και δομικά χαρακτηριστικά

Η γενική δομή και η χημική σύσταση των υπολειμμάτων βύνης ζυθοποιίας (Brewer's Spent Grain – BSG) απεικονίζονται σχηματικά στο Σχήμα 2.2, όπου παρουσιάζονται τα κύρια δομικά συστατικά της λιγνοκυτταρινούχας μήτρας, με έμφαση στα κύρια συστατικά τους (κυτταρίνη, ημικυτταρίνη, λιγνίνη και πρωτεΐνες).

Σχήμα 2.2. Δομή / σύσταση του BSG (cellulose – hemicellulose – lignin – proteins)



Πηγή: Προσαρμογή από Mussatto (2014) και Jackowski et al. (2020).

Από χημικοφυσική άποψη, το BSG αποτελεί ένα σύνθετο λιγνοκυτταρινούχο υλικό, με κύρια δομικά συστατικά:

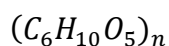
- Κυτταρίνη ($\approx 15\text{--}25\%$)
- Ημικυτταρίνη ($\approx 25\text{--}35\%$)
- Λιγνίνη ($\approx 15\text{--}30\%$)
- Πρωτεΐνες ($\approx 15\text{--}25\%$)
- μικρότερα ποσοστά λιπιδίων, ανόργανων στοιχείων και τέφρας (Mussatto, 2014; Dancker et al., 2025a)

Πίνακας 2.5. Χημική σύσταση και βασικά χαρακτηριστικά του BSG

Συστατικό	Περιεκτικότητα (%)	Λειτουργικός ρόλος
Κυτταρίνη	15–25	Δομική σταθερότητα
Ημικυτταρίνη	25–35	Προσρόφηση μέσω $-\text{OH}$
Λιγνίνη	15–30	Φαινολικές ομάδες
Πρωτεΐνες	15–25	Αμινομάδες ($-\text{NH}_2$)
Τέφρα	2–5	Ανόργανα ιόντα

Πηγή: Προσαρμογή από Mussatto (2014); Jackowski et al. (2020); Chetrariu & Dabija (2020); Carrasco et al. (2022).

Η κυτταρίνη αποτελείται από γραμμικές αλυσίδες β-D-γλυκόζης συνδεδεμένες με δεσμούς β(1→4):



Η ημικυτταρίνη περιλαμβάνει ετεροπολυσακχαρίτες (π.χ. ξυλάνες, αραβινάνες), ενώ η λιγνίνη αποτελεί ένα τρισδιάστατο αρωματικό πολυμερές, πλούσιο σε φαινολικές δομές. Η παρουσία αυτών των δομικών στοιχείων προσδίδει στο BSG μηχανική σταθερότητα, αλλά και πληθώρα λειτουργικών ομάδων, όπως:

- υδροξυλομάδες (–OH),
- καρβοξυλομάδες (–COOH),
- φαινολικές ομάδες,
- αμινομάδες (–NH₂) από πρωτεϊνικά κλάσματα.

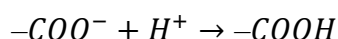
Οι ομάδες αυτές είναι κρίσιμες για τη χημική αλληλεπίδραση του BSG με ρύπους σε υδατικά συστήματα (Su et al., 2021).

2.4.3 Ιδιότητες σχετικές με εφαρμογές προσρόφησης και επεξεργασίας

Οι χημικές και δομικές ιδιότητες του BSG το καθιστούν κατάλληλο για χρήση ως βιοπροσροφητικό υλικό (biosorbent). Οι μηχανισμοί μέσω των οποίων το BSG μπορεί να απομακρύνει ρύπους από υδατικά διαλύματα περιλαμβάνουν:

α) Ηλεκτροστατικές αλληλεπιδράσεις

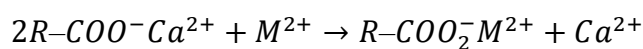
Οι λειτουργικές ομάδες του BSG μπορούν να φέρουν θετικό ή αρνητικό φορτίο ανάλογα με το pH του διαλύματος. Για παράδειγμα, σε όξινες συνθήκες, οι καρβοξυλομάδες πρωτονιώνονται:



ενώ σε αλκαλικό pH αποπρωτονιώνονται, διευκολύνοντας την προσρόφηση κατιονικών ρύπων (π.χ. βαρέα μέταλλα) (Carrasco et al., 2022).

β) Ιοντοανταλλαγή

Το BSG μπορεί να λειτουργήσει ως φορέας ιοντοανταλλαγής, όπου κατιόντα όπως Ca^{2+} ή Mg^{2+} αντικαθίστανται από ιόντα μετάλλων:



γ) Φυσική προσρόφηση και επιφανειακές αλληλεπιδράσεις

Η πορώδης δομή και η σχετικά μεγάλη ειδική επιφάνεια του BSG (η οποία αυξάνεται σημαντικά μετά από τροποποίηση ή μετατροπή σε biochar) επιτρέπουν φυσική προσρόφηση οργανικών ενώσεων μέσω δυνάμεων Van der Waals και δεσμών υδρογόνου (Chetrariu & Dabija, 2020).

δ) Χημική δέσμευση (complexation)

Οι φαινολικές και αμινομάδες μπορούν να σχηματίσουν σύμπλοκα με ιόντα μετάλλων, αυξάνοντας τη σταθερότητα της προσρόφησης (Su et al., 2021).

Συνολικά, η συνδυασμένη παρουσία λιγνοκυτταρινούχου μήτρας, λειτουργικών ομάδων και πορώδους δομής καθιστά το BSG ένα ιδιαίτερα ελκυστικό υλικό για εφαρμογές επεξεργασίας υγρών αποβλήτων, ειδικά όταν εντάσσεται σε ολοκληρωμένες στρατηγικές κυκλικής οικονομίας (Kirchherr et al., 2017).

2.5 Απόβλητα ως πόρος: αξιοποίηση BSG στο πλαίσιο κυκλικής οικονομίας

Η σύγχρονη προσέγγιση στη διαχείριση αποβλήτων μετατοπίζεται από τη γραμμική λογική «παράγω-καταναλώνω-απορρίπτω» προς μοντέλα κυκλικής οικονομίας, όπου τα απόβλητα αντιμετωπίζονται ως δυνητικοί πόροι. Στο πλαίσιο αυτό, τα υπολείμματα βύνης (Brewer's Spent Grain – BSG) αποκτούν ιδιαίτερη σημασία, καθώς παράγονται σε μεγάλες ποσότητες και μπορούν να αξιοποιηθούν σε εφαρμογές περιβαλλοντικής τεχνολογίας, όπως η επεξεργασία υγρών αποβλήτων ζυθοποιίας (Mussatto, 2014; Jackowski et al., 2020).

Η λογική της «αξιοποίησης» (valorisation) συνδέεται άμεσα με τη μείωση της περιβαλλοντικής επιβάρυνσης, την ανάκτηση υλικών/ενέργειας και τη δημιουργία προστιθέμενης αξίας από ένα υποπροϊόν που αλλιώς θα οδηγούνταν σε διάθεση ή χαμηλής αξίας χρήση (Chetrariu & Dabija, 2020). Παράλληλα, η ένταξη του BSG σε τεχνολογίες επεξεργασίας αποβλήτων εναρμονίζεται με την έννοια της κυκλικότητας, καθώς επιδιώκεται η «σύζευξη» στερεών και υγρών ρευμάτων αποβλήτων της ίδιας βιομηχανίας: ένα στερεό υποπροϊόν μπορεί να λειτουργήσει ως υλικό απορρύπανσης για το υγρό ρεύμα, μειώνοντας ταυτόχρονα το συνολικό αποτύπωμα της παραγωγικής διαδικασίας (Kirchherr et al., 2017; Geissdoerfer et al., 2017).

Η αξιοποίηση του BSG ως υλικού περιβαλλοντικών εφαρμογών εντάσσεται στη λογική της κυκλικής οικονομίας, όπου τα υποπροϊόντα της βιομηχανίας τροφίμων επαναεισάγονται σε παραγωγικές διεργασίες. Σύγχρονες ανασκοπήσεις επισημαίνουν ότι το BSG παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον λόγω της λιγνοκυτταρινικής του δομής και της αφθονίας λειτουργικών ομάδων που επιτρέπουν εφαρμογές προσρόφησης και καταλυτικής χρήσης (Dancker et al., 2025a; Chetrariu & Dabija, 2020). Η προσέγγιση αυτή συνδυάζει περιβαλλοντικά και οικονομικά οφέλη, μειώνοντας το κόστος διαχείρισης αποβλήτων και συμβάλλοντας στη βιώσιμη βιομηχανική παραγωγή.

2.5.1 Προσέγγιση circular economy στη βιομηχανία τροφίμων/ποτών

Η κυκλική οικονομία (circular economy) αποτελεί ένα πλαίσιο αρχών και πρακτικών που στοχεύει στη διατήρηση της αξίας των πόρων (υλικών, ενέργειας και προϊόντων) στο οικονομικό σύστημα για όσο το δυνατόν μεγαλύτερο χρονικό διάστημα. Η μετάβαση σε κυκλικά μοντέλα βασίζεται σε στρατηγικές όπως η πρόληψη δημιουργίας αποβλήτων, η επαναχρησιμοποίηση, η ανακύκλωση και η ανάκτηση, με παράλληλη μείωση της εξάρτησης από πρωτογενείς πρώτες ύλες (Kirchherr et al., 2017).

Στη βιομηχανία τροφίμων και ποτών, η κυκλική οικονομία αποκτά ιδιαίτερη σημασία λόγω της υψηλής κατανάλωσης φυσικών πόρων (ιδίως νερού και ενέργειας) και της παραγωγής μεγάλων ποσοτήτων υποπροϊόντων οργανικής φύσης. Τα υποπροϊόντα αυτά, λόγω της βιοχημικής τους σύστασης (π.χ. λιγνοκυτταρινούχα

κλάσματα, πρωτεΐνες, ίνες), μπορούν να αποτελέσουν δευτερογενείς πόρους για νέες εφαρμογές, μειώνοντας τις ανάγκες διάθεσης και προσδίδοντας πρόσθετη αξία στην παραγωγική αλυσίδα (Mussatto, 2014; Chetrariu & Dabija, 2020).

Από θεωρητική σκοπιά, η κυκλική οικονομία δεν περιορίζεται στη διαχείριση αποβλήτων, αλλά συνδέεται με την ανασχεδίαση συστημάτων παραγωγής και κατανάλωσης, ώστε να ελαχιστοποιούνται οι απώλειες πόρων και να μεγιστοποιείται η αποδοτικότητα σε επίπεδο κύκλου ζωής. Έτσι, η αξιοποίηση υποπροϊόντων όπως το BSG μπορεί να λειτουργήσει ως πρακτική έκφραση της κυκλικής οικονομίας, ιδιαίτερα όταν προωθείται η τοπική/ενδο-βιομηχανική χρήση (industrial symbiosis), δηλαδή η χρήση ενός παραπροϊόντος εντός του ίδιου κλάδου ως υλικό εισροής για άλλη διεργασία (Geissdoerfer et al., 2017; Kirchherr et al., 2017).

2.5.2 Οικολογικά και οικονομικά οφέλη αξιοποίησης BSG

Η αξιοποίηση του BSG παρουσιάζει διττά οφέλη: (α) περιβαλλοντικά/οικολογικά και (β) οικονομικά/λειτουργικά, τόσο για τις ζυθοποιίες όσο και για την ευρύτερη αλυσίδα αξίας.

(α) Οικολογικά οφέλη

Σε περιβαλλοντικό επίπεδο, η αξιοποίηση του BSG συμβάλλει στη μείωση των στερεών αποβλήτων που απαιτούν διαχείριση και διάθεση. Δεδομένου ότι το BSG παράγεται με υψηλή υγρασία και είναι επιρρεπές σε ταχεία αποδόμηση, η μη αξιοποίησή του μπορεί να οδηγήσει σε αυξημένο κόστος αποθήκευσης/μεταφοράς και σε περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις (π.χ. οσμές, μικροβιακή ανάπτυξη). Η μετατροπή του σε χρήσιμο υλικό (π.χ. biosorbent ή πρώτη ύλη για biochar/activated carbon) μειώνει την ανάγκη τελικής διάθεσης και προωθεί την ανάκτηση υλικών (Mussatto, 2014; Jackowski et al., 2020).

Παράλληλα, η χρήση BSG για την επεξεργασία υγρών αποβλήτων μπορεί να μειώσει το περιβαλλοντικό αποτύπωμα της επεξεργασίας, καθώς αντικαθιστά (εν μέρει) συμβατικά υλικά/χημικά με ένα βιογενές και χαμηλού κόστους υλικό. Επιπλέον, όταν το BSG τροποποιείται ή μετατρέπεται σε biochar/ενεργό άνθρακα,

μπορεί να επιτυγχάνει αυξημένη προσροφητική ικανότητα, ενισχύοντας την απομάκρυνση οργανικών ρύπων, χρωστικών ή ιόντων μετάλλων και βελτιώνοντας την ποιότητα εκροής (Chetrariu & Dabija, 2020; Su et al., 2021).

(β) Οικονομικά και λειτουργικά οφέλη

Σε οικονομικό επίπεδο, το BSG θεωρείται υλικό χαμηλής ή μηδενικής αξίας για τη ζυθοποιία, εφόσον παραδοσιακά διατίθεται ως ζωοτροφή ή απομακρύνεται με κόστος. Η αξιοποίησή του ως προσροφητικό υλικό μπορεί να μετατρέψει ένα κόστος διαχείρισης σε δυνητικό όφελος, είτε μέσω άμεσης χρήσης εντός της ίδιας μονάδας (π.χ. ως στάδιο προεπεξεργασίας/προσρόφησης) είτε μέσω παραγωγής προϊόντων υψηλότερης αξίας, όπως βιοάνθρακες ή ενεργοί άνθρακες (Mussatto, 2014; Chetrariu & Dabija, 2020).

Επιπρόσθετα, η κυκλική αξιοποίηση του BSG μπορεί να οδηγήσει σε μείωση του συνολικού κόστους επεξεργασίας αποβλήτων, ιδίως όταν περιορίζεται η ανάγκη χρήσης εμπορικών προσροφητικών υλικών ή χημικών αντιδραστηρίων. Για παράδειγμα, η βιβλιογραφία δείχνει ότι υλικά με βάση BSG μπορούν να εμφανίζουν αξιόλογη ικανότητα δέσμευσης ιόντων μετάλλων, γεγονός που υποστηρίζει τη δυνατότητα εφαρμογής τους σε στοχευμένες περιπτώσεις βιομηχανικών εκροών ή μικτών αποβλήτων (Carrasco et al., 2022; Su et al., 2021).

Τέλος, σε στρατηγικό επίπεδο, η υιοθέτηση κυκλικών πρακτικών μπορεί να ενισχύσει την περιβαλλοντική εικόνα και συμμόρφωση μιας ζυθοποιίας, να μειώσει κινδύνους που σχετίζονται με αυστηρότερα κανονιστικά όρια και να ενισχύσει την ανταγωνιστικότητα μέσω “green” πρακτικών, οι οποίες αποκτούν αυξανόμενη σημασία στη βιομηχανία τροφίμων και ποτών (Geissdoerfer et al., 2017; Kirchherr et al., 2017).

2.6 Μηχανισμοί απομάκρυνσης ρύπων με χρήση BSG

Η αξιοποίηση των υπολειμμάτων βύνης (Brewer’s Spent Grain – BSG) για την επεξεργασία υγρών αποβλήτων βασίζεται σε ένα σύνολο φυσικοχημικών μηχανισμών απομάκρυνσης ρύπων, οι οποίοι απορρέουν από τη λιγνοκυτταρινούχα δομή, την

πορώδη μορφολογία και την παρουσία ποικίλων λειτουργικών ομάδων στην επιφάνειά του. Σε αντίθεση με συμβατικά χημικά προσροφητικά υλικά, το BSG λειτουργεί ως βιοπροσροφητικό (biosorbent), όπου οι διεργασίες απομάκρυνσης πραγματοποιούνται κυρίως μέσω προσρόφησης, ιοντοανταλλαγής και επιφανειακών αλληλεπιδράσεων (Su et al., 2021; Carrasco et al., 2022).

Η κατανόηση αυτών των μηχανισμών είναι ζωτικής σημασίας για να εξηγήσουμε πώς αποδίδει το BSG σε διάφορα υδατικά συστήματα και για να ρυθμίσουμε σωστά τις συνθήκες λειτουργίας σε εφαρμογές επεξεργασίας υγρών αποβλήτων ζυθοποιίας. Στο Σχήμα 2.3 φαίνεται ένα εννοιολογικό διάγραμμα με τους κύριους μηχανισμούς (ηλεκτροστατικές αλληλεπιδράσεις, ιοντοανταλλαγή, φυσική προσρόφηση και σχηματισμό συμπλόκων) μέσω των οποίων το BSG μπορεί να απομακρύνει ρύπους από υδατικά διαλύματα.

Η ικανότητα του BSG να λειτουργεί ως προσροφητικό υλικό οφείλεται στην παρουσία υδροξυλικών, καρβοξυλικών και φαινολικών ομάδων στην επιφάνειά του, οι οποίες διευκολύνουν μηχανισμούς ιοντοανταλλαγής, χημειορρόφησης και ηλεκτροστατικών αλληλεπιδράσεων. Πειραματικές μελέτες έχουν δείξει ότι η φυσική και χημική τροποποίηση του υλικού ενισχύει σημαντικά την ικανότητα δέσμευσης βαρέων μετάλλων (Dancker, 2025; Su et al., 2021).

Σχήμα 2.3. Εννοιολογικό διάγραμμα μηχανισμών προσρόφησης ρύπων από BSG



Πηγή: Προσαρμογή από Su et al. (2021); Carrasco et al. (2022); Mussatto (2014).

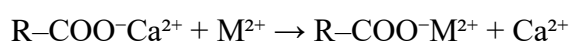
2.6.1 Προσρόφηση και ιοντοανταλλαγή

Η προσρόφηση, είναι ο βασικός τρόπος που φεύγουν οι ρύποι όταν χρησιμοποιούμε BSG. Είναι ένα επιφανειακό φαινόμενο: μόρια ή ιόντα ρύπων κολλάνε στην επιφάνεια του προσροφητικού υλικού μέσω φυσικών ή χημικών αλληλεπιδράσεων. Στην περίπτωση του BSG, η προσρόφηση μπορεί να αφορά τόσο οργανικούς ρύπους —π.χ. φαινολικές ενώσεις, χρωστικές— όσο και ανόργανα ιόντα, όπως βαρέα μέταλλα (Carrasco et al., 2022).

Από χημικοφυσική σκοπιά, την προσρόφηση την χωρίζουμε σε:

- Φυσική προσρόφηση (physisorption), που στηρίζεται σε ασθενείς δυνάμεις Van der Waals και δεσμούς υδρογόνου, και
- Χημική προσρόφηση (chemisorption), όπου δημιουργούνται πιο ισχυροί δεσμοί μεταξύ των ρύπων και των λειτουργικών ομάδων στην επιφάνεια του BSG (Su et al., 2021).

Παράλληλα, σημαντικό ρόλο διαδραματίζει ο μηχανισμός της ιοντοανταλλαγής, ιδιαίτερα κατά την απομάκρυνση κατιονικών ρύπων. Οι καρβοξυλομάδες και άλλες αρνητικά φορτισμένες ομάδες του BSG μπορούν να ανταλλάσσουν κατιόντα που είναι αρχικά συνδεδεμένα στη δομή του υλικού (π.χ. Ca^{2+} , Mg^{2+}) με ιόντα μετάλλων από το υδατικό διάλυμα:



Ο μηχανισμός αυτός εξηγεί τη σχετικά υψηλή αποδοτικότητα του BSG στην απομάκρυνση ιόντων μετάλλων, ιδιαίτερα σε όξινες ή ελαφρώς όξινες συνθήκες, όπου ευνοείται η κινητικότητα των κατιόντων (Carrasco et al., 2022).

2.6.2 Επιφανειακές λειτουργικές ομάδες και προσροφητικές αλληλεπιδράσεις

Η επιφάνεια του BSG χαρακτηρίζεται από πληθώρα λειτουργικών ομάδων, οι οποίες προέρχονται κυρίως από τα συστατικά της κυτταρίνης, της ημικυτταρίνης, της λιγνίνης και των πρωτεϊνών. Οι σημαντικότερες λειτουργικές ομάδες περιλαμβάνουν:

- υδροξυλομάδες (–OH),
- καρβοξυλομάδες (–COOH),
- φαινολικές ομάδες,
- αμινομάδες (–NH₂).

Οι ομάδες αυτές είναι υπεύθυνες για την ανάπτυξη διαφόρων επιφανειακών αλληλεπιδράσεων με τους ρύπους. Για παράδειγμα, οι καρβοξυλομάδες μπορούν να πρωτονιώνονται ή να αποπρωτονιώνονται ανάλογα με το pH του διαλύματος:



Η μεταβολή αυτή επηρεάζει το επιφανειακό φορτίο του BSG και, κατά συνέπεια, τη δυνατότητα προσρόφησης ανιονικών ή κατιονικών ρύπων. Σε αλκαλικό pH, η αποπρωτονίωση των ομάδων οδηγεί σε αρνητικά φορτισμένη επιφάνεια, ευνοώντας την προσρόφηση κατιόντων, ενώ σε όξινες συνθήκες μπορεί να ενισχυθεί η δέσμευση ανιονικών ειδών (Su et al., 2021).

Επιπλέον, οι φαινολικές και αμινομάδες μπορούν να συμμετέχουν σε μηχανισμούς χημικής δέσμευσης (complexation), σχηματίζοντας σταθερά σύμπλοκα με ιόντα μετάλλων. Οι δεσμοί αυτοί είναι ισχυρότεροι από τις απλές ηλεκτροστατικές αλληλεπιδράσεις και συμβάλλουν στην αυξημένη σταθερότητα της προσρόφησης, ιδιαίτερα σε τροποποιημένα υλικά BSG ή σε παράγωγα biochar/ενεργού άνθρακα (Chetrariu & Dabija, 2020).

2.6.3 Παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση (pH, χρόνος, θερμοκρασία κ.λπ.)

Η αποδοτικότητα απομάκρυνσης ρύπων με χρήση BSG δεν αποτελεί σταθερό χαρακτηριστικό, αλλά εξαρτάται από πληθώρα λειτουργικών και περιβαλλοντικών παραμέτρων. Οι σημαντικότεροι παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση συνοψίζονται ως εξής:

- pH του διαλύματος

Το pH θεωρείται ο πλέον καθοριστικός παράγοντας, καθώς επηρεάζει τόσο το φορτίο της επιφάνειας του BSG όσο και τη χημική μορφή των ρύπων. Μεταβολές του pH μπορούν να μεταβάλουν δραστικά την προσροφητική ικανότητα, ιδίως για ιοντικούς ρύπους (Su et al., 2021).

- Χρόνος επαφής

Η προσρόφηση συνήθως γίνεται γρήγορα στην αρχή — υπάρχουν πολλές ενεργές θέσεις στην επιφάνεια του BSG. Μετά, όμως, πέφτει ρυθμός και προχωράει πιο αργά μέχρι να φτάσει σε κάποια ισορροπία. Ο επαρκής χρόνος επαφής είναι απαραίτητος για τη μέγιστη απομάκρυνση ρύπων, ιδιαίτερα σε συστήματα παρτίδας (batch systems).

- Δοσολογία προσροφητικού

Η αύξηση της ποσότητας BSG οδηγεί σε μεγαλύτερη συνολική επιφάνεια και περισσότερες ενεργές θέσεις προσρόφησης. Ωστόσο, πέρα από κάποιο όριο, η απόδοση ανά μονάδα μάζας μπορεί να μειωθεί λόγω επικάλυψης ή συσσωμάτωσης σωματιδίων (Chetrariu & Dabija, 2020).

- Θερμοκρασία

Η θερμοκρασία, παίζει ρόλο στην κινητικότητα των μορίων και επηρεάζει κι όλη τη θερμοδυναμική της προσρόφησης. Σε πολλές περιπτώσεις, η αύξηση της θερμοκρασίας ενισχύει την προσρόφηση οργανικών ρύπων, αν και μπορεί να έχει αρνητική επίδραση στη σταθερότητα ορισμένων δεσμών.

- Αρχική συγκέντρωση ρύπων και συνύπαρξη άλλων ιόντων

Υψηλές συγκεντρώσεις ρύπων αυξάνουν τη κινητήρια δύναμη της προσρόφησης, αλλά η παρουσία ανταγωνιστικών ιόντων σε πραγματικά απόβλητα μπορεί να μειώσει την αποδοτικότητα σε σύγκριση με εργαστηριακά διαλύματα (Su et al., 2021).

Συνεπώς, η βελτιστοποίηση των παραμέτρων αυτών αποτελεί προϋπόθεση για την αποτελεσματική εφαρμογή του BSG σε πραγματικές συνθήκες επεξεργασίας υγρών αποβλήτων ζυθοποιίας και εξηγεί τις διαφοροποιήσεις που παρατηρούνται μεταξύ εργαστηριακών και βιομηχανικών εφαρμογών.

Οι κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν την αποδοτικότητα προσρόφησης ρύπων από το BSG συνοψίζονται στον Πίνακα 2.6.

Πίνακας 2.6. Παράγοντες που επηρεάζουν την προσρόφηση ρύπων από BSG

Παράγοντας	Επίδραση
pH	Μεταβάλλει φορτίο επιφάνειας
Χρόνος επαφής	Καθορίζει επίτευξη ισορροπίας
Δοσολογία BSG	Αυξάνει ενεργές θέσεις
Θερμοκρασία	Επηρεάζει κινητική
Συνύπαρξη ιόντων	Ανταγωνιστική προσρόφηση

Πηγή: Προσαρμογή από Chetrariu & Dabija (2020); Su et al. (2021); Carrasco et al. (2022).

2.7 Τροποποιημένο BSG και βελτίωση απόδοσης

Παρότι το ακατέργαστο BSG (raw BSG) παρουσιάζει αξιόλογη ικανότητα απομάκρυνσης ρύπων, η βιβλιογραφία καταδεικνύει ότι η προσροφητική του απόδοση μπορεί να ενισχυθεί σημαντικά μέσω κατάλληλων τροποποιήσεων. Οι τροποποιήσεις αυτές στοχεύουν κυρίως στη βελτίωση της επιφανειακής χημείας, στην αύξηση της ειδικής επιφάνειας και της πορώδους δομής, καθώς και στη δημιουργία νέων ενεργών θέσεων προσρόφησης (Chetrariu & Dabija, 2020; Su et al., 2021).

Στο πλαίσιο αυτό, έχουν αναπτυχθεί διάφορες προσεγγίσεις τροποποίησης του BSG, οι οποίες περιλαμβάνουν χημικές και θερμικές κατεργασίες, μετατροπή σε βιοάνθρακα (biochar), παραγωγή ενεργού άνθρακα, καθώς και ανάπτυξη σύνθετων υλικών ή νανοϋλικών με βάση το BSG. Οι προσεγγίσεις αυτές επιδιώκουν να καταστήσουν το υλικό περισσότερο ανταγωνιστικό έναντι συμβατικών προσροφητικών μέσων, χωρίς να αναιρούν τα πλεονεκτήματα χαμηλού κόστους και περιβαλλοντικής βιωσιμότητας. Οι βασικές διαδρομές τροποποίησης του BSG και η εξέλιξή του σε υλικά υψηλότερης προσροφητικής ικανότητας παρουσιάζονται συνοπτικά στο Σχήμα 2.4.

Εκτός από τη χρήση του ως φυσικό βιοπροσροφητικό, το BSG μπορεί να μετατραπεί σε ενεργό άνθρακα μέσω θερμικής ή χημικής ενεργοποίησης, αποκτώντας αυξημένη ειδική επιφάνεια και βελτιωμένη προσροφητική ικανότητα. Πρόσφατες μελέτες έχουν δείξει ότι ενεργοποιημένα υλικά από BSG παρουσιάζουν υψηλή απόδοση στην απομάκρυνση χρωστικών και οργανικών ρύπων μέσω συνδυασμένων μηχανισμών προσρόφησης και οξειδωσης (Gomez-Delgado et al., 2025).

Σχήμα 2.4. Διαδρομές τροποποίησης BSG (*chemical treatment* → *biochar* → *activated carbon*)



Πηγή: Προσαρμογή από Chetrariu & Dabija (2020); Dancker et al. (2025a); Gomez-Delgado et al. (2025).

2.7.1 Χημικές και θερμικές τροποποιήσεις BSG

Οι χημικές τροποποιήσεις του BSG αποσκοπούν κυρίως στη μεταβολή της επιφανειακής χημείας και στη δημιουργία ή ενίσχυση λειτουργικών ομάδων που ευνοούν την προσρόφηση ρύπων. Στη βιβλιογραφία αναφέρονται τροποποιήσεις με όξινα ή αλκαλικά διαλύματα (π.χ. HCl, HNO₃, NaOH), οι οποίες μπορούν να προκαλέσουν απολιγνίωση, απομάκρυνση ανόργανων συστατικών και αύξηση της διαθεσιμότητας καρβοξυλομάδων και υδροξυλομάδων στην επιφάνεια του υλικού (Chetrariu & Dabija, 2020).

Για παράδειγμα, η όξινη κατεργασία μπορεί να προκαλέσει υδρόλυση δεσμών της λιγνοκυτταρινούχας μήτρας και να αυξήσει την αρνητικά φορτισμένη επιφάνεια, οπότε ενισχύεται η προσρόφηση κατιονικών ρύπων. Η αλκαλική κατεργασία, με τη σειρά της, συμβάλλει στη διόγκωση της δομής και βελτιώνει την προσβασιμότητα των ενεργών θέσεων (Carrasco et al., 2022).

Οι θερμικές τροποποιήσεις —όπως μια ήπια θερμική κατεργασία ή η ξήρανση σε ελεγχόμενες θερμοκρασίες— μπορούν να αλλάξουν τη μορφολογία και τη σταθερότητα του BSG, χωρίς όμως να μεταβάλλουν ριζικά τη χημική του σύσταση. Οι απλές θερμικές κατεργασίες θεωρούνται συνήθως λιγότερο αποτελεσματικές σε

σύγκριση με πιο «σκληρές» θερμοχημικές διεργασίες, όπως η πυρόλυση για παραγωγή biochar (Mussatto, 2014).

Συνολικά, οι χημικές και θερμικές τροποποιήσεις είναι σχετικά απλές και χαμηλού κόστους τεχνικές που μπορούν να ανεβάσουν την απόδοση του BSG αν και συχνά συνοδεύονται από θέματα σχετικά με την κατανάλωση χημικών και την παραγωγή δευτερογενών ρευμάτων αποβλήτων (Chetrariu & Dabija, 2020).

2.7.2 Παραγωγή biochar από BSG

Η μετατροπή του BSG σε βιοάνθρακα (biochar) μέσω πυρόλυσης έχει τραβήξει αρκετή προσοχή. Παράγεται ένα υλικό με πιο ανοιχτή πορώδη δομή και μεγαλύτερη ειδική επιφάνεια. Η πυρόλυση γίνεται συνήθως χωρίς οξυγόνο ή με πολύ λίγο, σε θερμοκρασίες περί τα 400–700 °C (Chetrariu & Dabija, 2020).

Σε αυτή τη διαδικασία φεύγουν τα πτητικά και η λιγνοκυτταρινούχα μήτρα μετατρέπεται σε πιο σταθερό ανθρακούχο υπόλειμμα. Το biochar από BSG δείχνει αυξημένο αριθμό μικρο- και μεσοπόρων, κάτι που βοηθάει στην προσρόφιση οργανικών ρύπων και χρωστικών — με δυνάμεις Van der Waals και π-π αλληλεπιδράσεις (Su et al., 2021).

Εκτός από την πορώδη δομή, το biochar διατηρεί και κάποιες επιφανειακές λειτουργικές ομάδες που μπορούν να μπουν σε ηλεκτροστατικές αλληλεπιδράσεις ή να δεσμεύσουν χημικά ρύπους. Μελέτες δείχνουν ότι το biochar από BSG αποδίδει σαφώς καλύτερα σε σχέση με το ακατέργαστο BSG, ειδικά στην απομάκρυνση οργανικών ενώσεων και βαρέων μετάλλων (Chetrariu & Dabija, 2020; Su et al., 2021).

Η παραγωγή biochar ταιριάζει με το πνεύμα της κυκλικής οικονομίας: παίρνεις ένα υγρό, ευπαθές υποπροϊόν και το κάνεις σταθερό, με περισσότερη αξία — για χρήση σε επεξεργασία αποβλήτων και άλλες περιβαλλοντικές εφαρμογές.

2.7.3 Παραγωγή ενεργού άνθρακα από BSG

Η περαιτέρω ενεργοποίηση του biochar, οδηγεί στην παραγωγή ενεργού άνθρακα από BSG — και αυτός έχει εξαιρετικά μεγάλη ειδική επιφάνεια και πολύ ανεπτυγμένη μικροπορώδη δομή. Η ενεργοποίηση μπορεί να γίνει με φυσικούς τρόπους (π.χ. χρήση ατμού ή CO₂ σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες) ή με χημικούς, δηλαδή μέσω εμποτισμού με ενεργοποιητικούς παράγοντες όπως KOH, H₃PO₄ ή ZnCl₂ (Chetrariu & Dabija, 2020).

Ο ενεργός άνθρακας από BSG δείχνει προσροφητικές ιδιότητες που, είναι συγκρίσιμες με αυτές των εμπορικών ενεργών ανθράκων — κυρίως στην απομάκρυνση χρωστικών, φαινολικών ενώσεων και άλλων οργανικών ρύπων με μεγάλο μοριακό βάρος. Πρόσφατες μελέτες δείχνουν ότι ενεργοποιημένα υλικά από BSG μπορούν να επιτύχουν πολύ υψηλά ποσοστά απομάκρυνσης (>80–90%) σε εργαστηριακές συνθήκες, καθιστώντας τα ιδιαίτερα ελκυστικά για εφαρμογές επεξεργασίας υγρών αποβλήτων (Gomez-Delgado et al., 2025).

Ωστόσο, η παραγωγή ενεργού άνθρακα φέρνει μαζί της μεγαλύτερο ενεργειακό και χημικό κόστος, κάτι που πρέπει να μετρηθεί σωστά όταν κρίνουμε τη βιωσιμότητα σε βιομηχανική κλίμακα. Παρά ταύτα, η δυνατότητα παραγωγής ενεργού άνθρακα από ένα διαθέσιμο βιομηχανικό υποπροϊόν υποστηρίζει τη στρατηγική ανάκτησης πόρων και μπορεί να μειώσει την εξάρτηση από συμβατικές πρώτες ύλες (Chetrariu & Dabija, 2020).

2.7.4 Σύνθετα υλικά και νανοϋλικά με βάση BSG

Πέρα από τις κλασικές τροποποιήσεις, τα τελευταία χρόνια υπάρχει έντονο ερευνητικό ενδιαφέρον για τη δημιουργία πιο σύνθετων υλικών και νανοϋλικών με βάση το BSG. Στις προσεγγίσεις αυτές, το BSG ή τα παράγωγά του (π.χ. biochar) συνδυάζονται με ανόργανα υλικά, μεταλλικά οξείδια ή νανοσωματίδια, με στόχο τη βελτίωση της εκλεκτικότητας και της προσροφητικής απόδοσης (Su et al., 2021).

Ενδεικτικά, έχουν αναφερθεί σύνθετα υλικά BSG–Fe₃O₄, τα οποία παρουσιάζουν μαγνητικές ιδιότητες, διευκολύνοντας την ανάκτηση του

προσοροφητικού μετά την επεξεργασία. Άλλες μελέτες εξετάζουν την ενσωμάτωση νανοσωματιδίων για την ενίσχυση ειδικών μηχανισμών, όπως η καταλυτική οξείδωση ή η εκλεκτική δέσμευση ιόντων μετάλλων (Su et al., 2021).

Παρότι τα σύνθετα υλικά παρουσιάζουν ιδιαίτερα υψηλές αποδόσεις σε εργαστηριακό επίπεδο, η εφαρμογή τους σε πραγματικές συνθήκες παραμένει περιορισμένη, κυρίως λόγω αυξημένου κόστους, πολυπλοκότητας σύνθεσης και ζητημάτων κλιμάκωσης. Ωστόσο, αποτελούν σημαντική ερευνητική κατεύθυνση για μελλοντικές εφαρμογές υψηλής εξειδίκευσης.

Πίνακας 2.7. Σύγκριση raw BSG έναντι τροποποιημένου BSG / biochar / ενεργού άνθρακα.

Υλικό	Προσοροφητική ικανότητα	Κόστος	Σταθερότητα
Raw BSG	Χαμηλή–μέτρια	Πολύ χαμηλό	Χαμηλή
Τροποποιημένο BSG	Μέτρια–υψηλή	Χαμηλό	Μέτρια
Biochar BSG	Υψηλή	Μέτριο	Υψηλή
Ενεργός άνθρακας BSG	Πολύ υψηλή	Υψηλό	Πολύ υψηλή

Πηγή: Προσαρμογή από Chetrariu & Dabija (2020); Dancker et al. (2025a); Gomez-Delgado et al. (2025); Carrasco et al. (2022).

2.8 Ερευνητικές εφαρμογές BSG στην επεξεργασία υγρών αποβλήτων

Η βιβλιογραφία των τελευταίων ετών καταδεικνύει αυξανόμενο ενδιαφέρον για την αξιοποίηση των υπολειμμάτων βύνης (Brewer’s Spent Grain – BSG) ως βιοπροσοροφητικού υλικού (biosorbent) ή ως πρόδρομης πρώτης ύλης για την παραγωγή biochar/ενεργού άνθρακα, με σκοπό την απομάκρυνση οργανικών και ανόργανων ρύπων από υδατικά συστήματα. Η προσέγγιση αυτή ευθυγραμμίζεται με την κυκλική οικονομία, καθώς προωθείται η αξιοποίηση ενός στερεού υποπροϊόντος για την αντιμετώπιση του υγρού ρεύματος αποβλήτων της ίδιας βιομηχανικής δραστηριότητας, μειώνοντας το συνολικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα (Kirchherr et al., 2017; Geissdoerfer et al., 2017; Chetrariu & Dabija, 2020).

2.8.1 Απομάκρυνση οργανικού φορτίου (COD/BOD)

Στα υγρά απόβλητα ζυθοποιίας, το οργανικό φορτίο (COD/BOD₅) οφείλεται κυρίως σε διαλυμένες και αιωρούμενες οργανικές ενώσεις (σάκχαρα, πρωτεΐνες, υπολείμματα γλεύκους/μπίρας, ζύμες), καθώς και σε επιμέρους ρεύματα καθαρισμού (CIP) που μεταβάλλουν τη χημική ισορροπία του αποβλήτου (Choi, 2016; Enitan et al., 2015). Η αξιοποίηση BSG στοχεύει κυρίως σε:

- προ-απομάκρυνση οργανικών ενώσεων μέσω προσρόφησης (ιδίως οργανικών μορίων που αλληλεπιδρούν με τις λειτουργικές ομάδες της λιγνοκυτταρινούχας μήτρας),
- μείωση μέρους του COD που σχετίζεται με κολλοειδή/αιωρούμενα οργανικά, όταν το BSG λειτουργεί ως χαμηλού κόστους προσροφητικό/φίλτρο ή ως υλικό προεπεξεργασίας,
- συνδυαστικές διατάξεις (π.χ. προσρόφηση → βιολογική επεξεργασία), όπου η προσρόφηση μπορεί να μειώνει αιχμές φορτίου και να βελτιώνει λειτουργικά τη σταθερότητα των βιολογικών διεργασιών (Fillaudeau et al., 2006; Henze et al., 2008; Chetrariu & Dabija, 2020).

Ωστόσο, τονίζεται ότι το BSG ως «ακατέργαστο» υλικό εμφανίζει περιορισμούς (π.χ. μεταβλητότητα πρώτης ύλης, πιθανή έκπλυση διαλυτών οργανικών, χαμηλότερη ειδική επιφάνεια σε σχέση με ενεργούς άνθρακες). Για τον λόγο αυτό, η βιβλιογραφία συχνά συγκλίνει στην αναβάθμιση μέσω τροποποίησης (βλ. §2.7), ώστε να αυξάνεται η προσροφητική ικανότητα και να καθίσταται πιο αξιόπιστη η εφαρμογή (Chetrariu & Dabija, 2020; Dancker et al., 2025a).

2.8.2 Απομάκρυνση βαρέων μετάλλων

Η απομάκρυνση ιόντων μετάλλων αποτελεί από τις πλέον τεκμηριωμένες εφαρμογές του BSG στη διεθνή βιβλιογραφία. Η ικανότητα δέσμευσης αποδίδεται σε συνδυασμό μηχανισμών: (α) ηλεκτροστατικές αλληλεπιδράσεις, (β) ιοντοανταλλαγή με κατιόντα που φέρει/συγκρατεί το υλικό, και (γ) σχηματισμό συμπλόκων

(complexation) με λειτουργικές ομάδες ($-\text{COOH}$, $-\text{OH}$, φαινολικές/αμινομάδες), όπως αναλύθηκε στη §2.6 (Su et al., 2021; Carrasco et al., 2022).

Ενδεικτικά, έχει αναφερθεί απομάκρυνση μετάλλων όπως Fe, Mn, Cd, Ni με χρήση BSG, αναδεικνύοντας τον ρόλο των επιφανειακών ομάδων και την επίδραση του pH στην αποδοτικότητα (Carrasco et al., 2022). Επιπλέον, μελέτες σταθερής κλίνης (fixed-bed) δείχνουν ότι η γεωμετρία και τα λειτουργικά χαρακτηριστικά της στήλης (παροχή, χρόνος παραμονής, κοκκομετρία) επηρεάζουν ουσιαστικά την απόδοση και τη δυνατότητα κλιμάκωσης (Dancker et al., 2025b). Τέλος, η «χημικά ενεργοποιημένη» μορφή BSG (π.χ. nitro-oxidation) έχει χρησιμοποιηθεί και για ειδικές κατηγορίες ρύπων όπως ουράνιο (U(VI)), υποδεικνύοντας ότι οι τροποποιήσεις μεταβάλλουν καθοριστικά τη χημεία επιφανείας και τις θέσεις δέσμησης (Su et al., 2021).

Το BSG έχει αξιολογηθεί ως βιοπροσροφητικό για την απομάκρυνση ιόντων μετάλλων όπως Fe^{2+} , Mn^{2+} , Cd^{2+} και Ni^{2+} , παρουσιάζοντας ικανοποιητικές αποδόσεις σε εργαστηριακές και δυναμικές διατάξεις ροής (Carrasco et al., 2022; Dancker et al., 2025b). Η εφαρμογή σε συστήματα σταθερής κλίνης καταδεικνύει τη δυνατότητα κλιμάκωσης της διεργασίας και την ενσωμάτωση της τεχνολογίας σε βιομηχανικές εφαρμογές.

2.8.3 Απομάκρυνση χρωστικών/φαινολικών ενώσεων

Η απομάκρυνση χρωστικών και φαινολικών ενώσεων παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον, καθώς σε βιομηχανικά απόβλητα μπορεί να συνυπάρχουν οργανικοί ρύποι ανθεκτικοί στη βιολογική αποδόμηση. Τα παράγωγα BSG (ιδίως biochar/ενεργός άνθρακας) είναι πιο κατάλληλα σε τέτοιες εφαρμογές, λόγω αυξημένης ειδικής επιφάνειας και ενισχυμένων προσροφητικών θέσεων (Chetrariu & Dabija, 2020; Dancker et al., 2025a).

Χαρακτηριστικά, έχει αναφερθεί αποτελεσματική απομάκρυνση της χρωστικής Orange II με ενεργούς άνθρακες που παρασκευάστηκαν από BSG, σε προσέγγιση που συνδυάζει προσρόφηση και ενζυμική οξείδωση, αναδεικνύοντας ότι η «αναβάθμιση»

του BSG μπορεί να διευρύνει σημαντικά το πεδίο εφαρμογών του σε οργανικούς ρύπους (Gomez-Delgado et al., 2025). Παράλληλα, η παρουσία λιγνίνης και φαινολικών ομάδων στη δομή του αρχικού BSG τεκμηριώνει θεωρητικά τη δυνατότητα αλληλεπίδρασης με αρωματικές/φαινολικές ενώσεις, αν και η πρακτική απόδοση εξαρτάται έντονα από το είδος τροποποίησης και τις συνθήκες λειτουργίας (Mussatto, 2014; Su et al., 2021).

2.8.4 Συγκριτική σύνθεση και αξιολόγηση μελετών (πίνακας μελετών)

Η συγκριτική σύνθεση των ερευνητικών εφαρμογών (τύπος BSG/παράγωγο, ρύπος-στόχος, συνθήκες, δείκτες απόδοσης) είναι κρίσιμη για να αναδειχθούν:

- οι κατηγορίες ρύπων όπου το BSG είναι πιο ανταγωνιστικό,
- οι λειτουργικές παράμετροι που καθορίζουν την αποτελεσματικότητα,
- τα κενά κλιμάκωσης (εργαστηριακή κλίμακα vs πραγματικά BWW) (Su et al., 2021; Dancker et al., 2025a).

Πίνακας 2.8. Σύνοψη ερευνητικών μελετών εφαρμογής BSG σε επεξεργασία αποβλήτων (authors/year/pollutant/removal%).

Συγγραφείς (Έτος)	Υλικό (μορφή)	Ρύπος/στόχος	Σύστημα/διάταξη	Κύριες παράμετροι (ενδεικτικά)	Δείκτης απόδοσης (όπως αναφέρεται στη μελέτη)
Carrasco et al. (2022)	BSG (biosorbent)	Fe, Mn, Cd, Ni	Παρτίδας (batch)	pH, χρόνος επαφής, δοσολογία	Removal % ανά μέταλλο (να συμπληρωθεί από το άρθρο)
Su et al. (2021)	Τροποποιημένο BSG (nitro-oxidation)	U(VI)	Παρτίδας (batch)	pH, αρχική συγκέντρωση, ισόθερμες/κινητική	Removal % / ικανότητα προσρόφησης (να συμπληρωθεί από το άρθρο)
Dancker et al. (2025b)	BSG (fixed-bed)	Βαρέα μέταλλα (model waters)	Σταθερή κλίνη (στήλη)	παροχή, χρόνος παραμονής, κοκκομετρία	Απόδοση στήλης/καμπύλες breakthrough (να συμπληρωθεί από το άρθρο)
Gomez-Delgado et al. (2025)	Ενεργός άνθρακας από BSG	Orange II (χρωστική)	Συνδυαστική διεργασία	συνθήκες προσρόφησης/ενζυμικής οξείδωσης	Removal % (να συμπληρωθεί από το άρθρο)
Chetrariu & Dabija (2020)	Ανασκόπηση	Πολλαπλοί ρύποι	—	—	Συγκριτική σύνθεση (δεν δίνει ενιαίο removal%)
Dancker et al. (2025a)	Ανασκόπηση	Πολλαπλοί ρύποι	—	—	Συγκριτική σύνθεση/δυνατότητες αξιοποίησης

Πηγή: Βιβλιογραφική σύνθεση με βάση Carrasco et al. (2022); Su et al. (2021); Dancker et al. (2025b); Gomez-Delgado et al. (2025).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗΣ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗΣ

3.1 Ερευνητικός σχεδιασμός και τύπος ανασκόπησης

Η παρούσα διπλωματική εργασία βασίζεται σε βιβλιογραφική ανασκόπηση της διεθνούς επιστημονικής βιβλιογραφίας, με στόχο τη συστηματική συλλογή, ανάλυση και σύνθεση υφιστάμενων ερευνητικών δεδομένων σχετικά με τη χρήση των υπολειμμάτων βύνης (Brewer's Spent Grain – BSG) στην επεξεργασία υγρών αποβλήτων ζυθοποιίας. Ο ερευνητικός σχεδιασμός εντάσσεται στο πλαίσιο της αφηγηματικής αλλά δομημένης βιβλιογραφικής ανασκόπησης (narrative review with systematic elements), καθώς δεν αποσκοπεί σε ποσοτική μετα-ανάλυση, αλλά σε κριτική σύνθεση και συγκριτική αξιολόγηση ετερογενών μελετών.

Η επιλογή αυτού του τύπου ανασκόπησης κρίνεται κατάλληλη λόγω:

- της ποικιλίας μορφών BSG (raw, modified, biochar, activated carbon),
- της ετερογένειας των ρύπων-στόχων (COD/BOD, βαρέα μέταλλα, χρωστικές, φαινολικές ενώσεις),
- των διαφοροποιήσεων στις πειραματικές συνθήκες (batch, fixed-bed, model solutions vs πραγματικά απόβλητα).

Η ανασκόπηση στοχεύει όχι μόνο στην περιγραφική παρουσίαση αποτελεσμάτων, αλλά και στην κριτική αποτίμηση της εφαρμοσιμότητας των ερευνητικών προσεγγίσεων, με έμφαση στη βιωσιμότητα και στην προοπτική κλιμάκωσης σε πραγματικές συνθήκες ζυθοποιίας.

3.2 Βάσεις δεδομένων και πηγές αναζήτησης

Η αναζήτηση της βιβλιογραφίας πραγματοποιήθηκε σε διεθνείς επιστημονικές βάσεις δεδομένων, οι οποίες θεωρούνται αξιόπιστες και ευρέως αποδεκτές για τη δημοσίευση εργασιών στους τομείς της περιβαλλοντικής μηχανικής, της διαχείρισης αποβλήτων και της βιομηχανίας τροφίμων και ποτών. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν οι ακόλουθες βάσεις δεδομένων:

- Scopus
- Web of Science
- ScienceDirect (Elsevier)
- MDPI
- SpringerLink
- ACS Publications
- Google Scholar (επικουρικά, για εντοπισμό γκρίζας βιβλιογραφίας και διδακτορικών διατριβών)

Επιπλέον, χρησιμοποιήθηκαν επιλεγμένα επιστημονικά συγγράμματα (π.χ. Mussatto, 2014· Henze et al., 2008· Metcalf & Eddy, 2014), καθώς και οδηγίες του Ελληνικού Ανοικτού Πανεπιστημίου σχετικά με τη σύνταξη και τη μεθοδολογία διπλωματικών εργασιών.

Πίνακας 3.1. Βάσεις δεδομένων και στρατηγική αναζήτησης βιβλιογραφίας

Βάση δεδομένων	Ενδεικτικά keywords / search strings	Σκοπός αναζήτησης
Scopus	“brewery wastewater” AND “brewer’s spent grain”	Μελέτες επεξεργασίας BWW με χρήση BSG
Web of Science	“BSG” AND adsorption AND wastewater	Προσρόφηση ρύπων με BSG
ScienceDirect	“brewery wastewater treatment” AND biosorbent	Τεχνολογίες επεξεργασίας & biosorbents
MDPI	“brewer’s spent grain” AND biochar	Τροποποίηση BSG / biochar
SpringerLink	“biosorption” AND “brewer’s spent grain”	Μηχανισμοί προσρόφησης
ACS Publications	“brewer’s spent grain” AND heavy metals	Απομάκρυνση βαρέων μετάλλων
Google Scholar	“BSG adsorption wastewater”	Συμπληρωματικές πηγές / διατριβές

Πηγή: Επεξεργασία συγγραφέα (στο πλαίσιο της μεθοδολογίας της παρούσας βιβλιογραφικής ανασκόπησης).

3.3 Λέξεις-κλειδιά και στρατηγική αναζήτησης

Η στρατηγική αναζήτησης βασίστηκε στον συνδυασμό λέξεων-κλειδιών και λογικών τελεστών (AND/OR), ώστε να καλύπτεται επαρκώς το εύρος του ερευνητικού αντικειμένου. Οι λέξεις-κλειδιά επιλέχθηκαν με γνώμονα:

- το αντικείμενο των υγρών αποβλήτων ζυθοποιίας,
- το υλικό BSG και τις μορφές τροποποίησής του,
- τους μηχανισμούς απομάκρυνσης ρύπων,
- το πλαίσιο της κυκλικής οικονομίας.

Ενδεικτικά, χρησιμοποιήθηκαν οι ακόλουθοι συνδυασμοί:

- *“brewery wastewater” AND “brewer’s spent grain”*
- *“BSG” AND “adsorption”*
- *“biosorbent” AND “brewery waste”*
- *“brewer’s spent grain” AND “heavy metals”*
- *“biochar from brewer’s spent grain”*
- *“circular economy” AND “brewing industry”*

Η αναζήτηση περιορίστηκε κυρίως σε άρθρα δημοσιευμένα την περίοδο 2000–2025, με έμφαση στη σύγχρονη βιβλιογραφία της τελευταίας δεκαετίας, ώστε να αποτυπώνεται η τρέχουσα ερευνητική κατεύθυνση.

3.4 Κριτήρια ένταξης και αποκλεισμού μελετών

Για τη διασφάλιση της ποιότητας και της συνέπειας της βιβλιογραφίας εφαρμόστηκαν σαφή κριτήρια ένταξης και αποκλεισμού.

Κριτήρια ένταξης:

- Δημοσιεύσεις σε επιστημονικά περιοδικά με κριτές (peer-reviewed).
- Μελέτες που εξετάζουν BSG ή παράγωγά του (τροποποιημένο BSG, biochar, ενεργός άνθρακας).

- Έρευνες που αφορούν επεξεργασία υγρών αποβλήτων ή υδατικών διαλυμάτων σχετικών με βιομηχανική ρύπανση.
- Άρθρα που παρουσιάζουν ποσοτικά ή ποιοτικά αποτελέσματα απομάκρυνσης ρύπων.
- Ανασκοπήσεις με σαφή μεθοδολογία και βιβλιογραφική τεκμηρίωση.

Κριτήρια αποκλεισμού:

- Μελέτες που αφορούν αποκλειστικά διατροφικές ή ζωοτροφικές χρήσεις του BSG χωρίς περιβαλλοντική διάσταση.
- Άρθρα χωρίς πλήρες κείμενο διαθέσιμο.
- Μη επιστημονικές πηγές ή δημοσιεύσεις χωρίς τεκμηριωμένη μεθοδολογία.
- Μελέτες που δεν παρουσιάζουν σαφή σύνδεση με επεξεργασία αποβλήτων ή υδατικά συστήματα.

Πίνακας 3.2. Κριτήρια ένταξης και αποκλεισμού μελετών

Κατηγορία	Κριτήρια ένταξης (Inclusion)	Κριτήρια αποκλεισμού (Exclusion)
Τύπος δημοσίευσης	Peer-reviewed άρθρα, διατριβές, επιστημονικά βιβλία	Μη επιστημονικές πηγές
Θεματική συνάφεια	Επεξεργασία υγρών αποβλήτων, BSG, προσρόφηση	Αποκλειστικά διατροφικές χρήσεις BSG
Υλικό	Raw BSG, modified BSG, biochar, activated carbon	Άλλα biosorbents χωρίς BSG
Ρύποι-στόχοι	COD/BOD, βαρέα μέταλλα, χρωστικές, φαινόλες	Άσχετοι ρύποι
Γλώσσα	Αγγλικά	Άλλες γλώσσες
Χρονικό εύρος	2000–2025	Παλαιότερες μελέτες χωρίς συνάφεια
Διαθεσιμότητα	Πλήρες κείμενο διαθέσιμο	Μόνο περίληψη

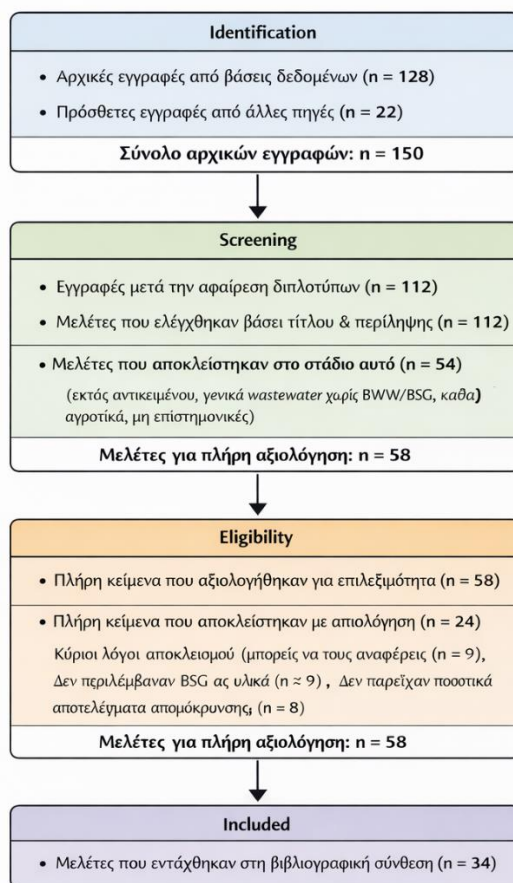
Πηγή: Επεξεργασία συγγραφέα, στο πλαίσιο της μεθοδολογίας της παρούσας βιβλιογραφικής ανασκόπησης.

3.5 Διαδικασία επιλογής και καταγραφής μελετών (flow diagram)

Η διαδικασία επιλογής των μελετών ακολούθησε διαδοχικά στάδια:

1. Αρχική αναζήτηση με βάση τις λέξεις-κλειδιά στις βάσεις δεδομένων.
2. Αφαίρεση διπλοτύπων.
3. Έλεγχος τίτλου και περίληψης για προκαταρκτική συνάφεια.
4. Ανάγνωση πλήρους κειμένου και εφαρμογή των κριτηρίων ένταξης/αποκλεισμού.
5. Τελική επιλογή των μελετών που εντάχθηκαν στη σύνθεση.

Σχήμα 3.1. Ροή επιλογής βιβλιογραφίας (PRISMA-like flow diagram)



Πηγή: Προσαρμογή από Page et al. (2021).

Η αρχική αναζήτηση στις επιλεγμένες βάσεις δεδομένων έβγαλε συνολικά 150 εγγραφές. Μετά την αφαίρεση των διπλοτύπων, έμειναν 112 μελέτες, οι οποίες

ελέγχθηκαν βάσει τίτλου και περίληψης, αποκλείστηκαν 54 ως μη συναφείς με το αντικείμενο. Στη συνέχεια αξιολογήθηκαν 58 πλήρη κείμενα, από τα οποία 24 αποκλείστηκαν γιατί δεν πληρούσαν τα κριτήρια ένταξης. Τελικά, 34 μελέτες εντάχθηκαν στη βιβλιογραφική σύνθεση, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.1.

3.6 Μέθοδος ανάλυσης και σύνθεσης δεδομένων

Η ανάλυση των επιλεγμένων μελετών πραγματοποιήθηκε με ποιοτική και συγκριτική προσέγγιση. Τα δεδομένα ομαδοποιήθηκαν θεματικά με βάση:

- τον τύπο υλικού (raw BSG, τροποποιημένο BSG, biochar, ενεργός άνθρακας),
- τον ρύπο-στόχο (COD/BOD, βαρέα μέταλλα, χρωστικές, φαινολικές ενώσεις),
- τον μηχανισμό απομάκρυνσης,
- τις πειραματικές συνθήκες (pH, δοσολογία, χρόνος επαφής, διάταξη).

Η σύνθεση των αποτελεσμάτων πραγματοποιήθηκε μέσω:

- συγκριτικών πινάκων (π.χ. Πίνακας 2.6),
- αφηγηματικής ανάλυσης,
- κριτικής αξιολόγησης πλεονεκτημάτων και περιορισμών κάθε προσέγγισης.

3.7 Αξιοπιστία, εγκυρότητα και περιορισμοί

Η αξιοπιστία της ανασκόπησης ενισχύεται από τη χρήση αναγνωρισμένων επιστημονικών βάσεων δεδομένων και από την επιλογή μελετών με τεκμηριωμένη μεθοδολογία. Ωστόσο, αναγνωρίζονται ορισμένοι περιορισμοί:

- ετερογένεια πειραματικών συνθηκών και τύπων αποβλήτων,
- περιορισμένη συγκρισιμότητα εργαστηριακών και βιομηχανικών εφαρμογών,
- έλλειψη μακροχρόνιων δεδομένων κλιμάκωσης.

Οι περιορισμοί αυτοί λαμβάνονται υπόψη στη συζήτηση των αποτελεσμάτων (Κεφάλαιο 4) και στις προτάσεις για μελλοντική έρευνα (Κεφάλαιο 5).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

4.1 Κατηγοριοποίηση μελετών και θεματικές ενότητες

Η βιβλιογραφική ανασκόπηση κατέδειξε ότι οι μελέτες που εξετάζουν την αξιοποίηση των υπολειμμάτων βύνης (Brewer's Spent Grain – BSG) στην επεξεργασία υγρών αποβλήτων μπορούν να ομαδοποιηθούν σε διακριτές θεματικές ενότητες. Η κατηγοριοποίηση αυτή διευκολύνει τη συστηματική ανάλυση και τη συγκριτική αποτίμηση των αποτελεσμάτων.

Συγκεκριμένα, οι μελέτες διακρίνονται σε:

- α) μελέτες απομάκρυνσης οργανικού φορτίου (COD/BOD),
- β) μελέτες απομάκρυνσης βαρέων μετάλλων,
- γ) μελέτες απομάκρυνσης χρωστικών ή φαινολικών ενώσεων, και
- δ) μελέτες που εξετάζουν την τροποποίηση του BSG (χημική, θερμική ή παραγωγή biochar/ενεργού άνθρακα) και τη συγκριτική του απόδοση έναντι συμβατικών προσροφητικών υλικών (Carrasco et al., 2022· Dancker et al., 2025a).

Η πλειονότητα των μελετών είναι εργαστηριακής κλίμακας (batch ή fixed-bed πειράματα), ενώ περιορισμένος αριθμός αναφέρεται σε πιλοτικές ή ημιβιομηχανικές εφαρμογές (Shumbe et al., 2024).

Πίνακας 4.1. Ομαδοποίηση επιλεγμένων βιβλιογραφικών μελετών ανάλογα με τον τύπο υλικού BSG που χρησιμοποιήθηκε για την επεξεργασία υγρών αποβλήτων.

Τύπος υλικού	Ενδεικτικές μελέτες (authors/year)	Κύρια κατηγορία ρύπων	Κλίμακα μελέτης
Raw BSG	Mussatto (2014); Jackowski et al. (2020)	Οργανικό φορτίο, μέταλλα (χαμηλή απόδοση)	Εργαστηριακή
Χημικά τροποποιημένο BSG	Su et al. (2021); Carrasco et al. (2022)	Βαρέα μέταλλα	Εργαστηριακή

Τύπος υλικού	Ενδεικτικές μελέτες (authors/year)	Κύρια κατηγορία ρύπων	Κλίμακα μελέτης
BSG biochar	Chetrariu & Dabija (2020); Dancker et al. (2025a)	Οργανικοί ρύποι, μέταλλα	Εργαστηριακή
Ενεργός άνθρακας από BSG	Dancker et al. (2025b); Gomez-Delgado et al. (2025)	Μέταλλα, χρωστικές	Εργαστηριακή / πιλοτική

Πηγή: Επεξεργασία συγγραφέα, βάσει των αναφερόμενων μελετών.

4.2 Αποτελεσματικότητα BSG στην απομάκρυνση ρύπων

Τα αποτελέσματα της βιβλιογραφίας δείχνουν ότι το BSG παρουσιάζει αξιοσημείωτη ικανότητα απομάκρυνσης ρύπων, κυρίως μέσω μηχανισμών προσρόφησης. Η απόδοση εξαρτάται από τον τύπο του ρύπου, τη μορφή του BSG (raw ή τροποποιημένο) και τις λειτουργικές συνθήκες.

Σε ό,τι αφορά το οργανικό φορτίο, αρκετές μελέτες καταγράφουν σημαντική μείωση του COD, ιδιαίτερα όταν το BSG χρησιμοποιείται ως προσροφητικό ή ως υλικό υποστήριξης σε συνδυασμένες διεργασίες (Fillaudeau et al., 2006· Kebede, 2018). Ωστόσο, η απομάκρυνση του BOD εμφανίζεται συχνά περιορισμένη σε σύγκριση με βιολογικές διεργασίες, γεγονός που υποδεικνύει ότι το BSG λειτουργεί συμπληρωματικά και όχι ως αυτόνομη λύση πλήρους επεξεργασίας.

Αντίθετα, στην απομάκρυνση βαρέων μετάλλων (π.χ. Fe^{2+} , Mn^{2+} , Cd^{2+} , Ni^{2+}), το BSG παρουσιάζει υψηλές αποδόσεις, που σε ορισμένες περιπτώσεις υπερβαίνουν το 70–90%, ιδίως μετά από κατάλληλη τροποποίηση (Carrasco et al., 2022· Su et al., 2021).

4.3 Σύγκριση raw BSG έναντι τροποποιημένου BSG / biochar / ενεργού άνθρακα

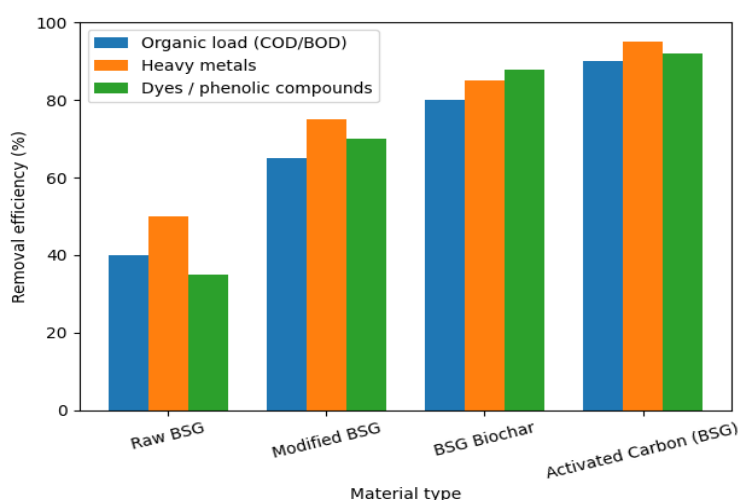
Η συγκριτική ανάλυση των μελετών καταδεικνύει σαφή διαφοροποίηση μεταξύ ακατέργαστου (raw) BSG και τροποποιημένων μορφών του. Το raw BSG εμφανίζει περιορισμένη ειδική επιφάνεια και χαμηλότερη προσροφητική ικανότητα, γεγονός που περιορίζει την απόδοσή του σε απαιτητικές εφαρμογές (Mussatto, 2014).

Αντίθετα, η χημική ή θερμική τροποποίηση του BSG, καθώς και η μετατροπή του σε biochar ή ενεργό άνθρακα, οδηγεί σε:

- αύξηση της ειδικής επιφάνειας,
- ενίσχυση των επιφανειακών λειτουργικών ομάδων, και
- βελτίωση της ικανότητας δέσμευσης ρύπων.

Μελέτες δείχνουν ότι το τροποποιημένο BSG μπορεί να προσεγγίσει ή και να ανταγωνιστεί την απόδοση εμπορικού ενεργού άνθρακα, με σημαντικά χαμηλότερο κόστος πρώτης ύλης (Dancker et al., 2025b; Gomez-Delgado et al., 2025).

Σχήμα 4.1. Συγκριτική απεικόνιση της αποδοτικότητας απομάκρυνσης ρύπων από διαφορετικές μορφές BSG (raw, τροποποιημένο, biochar και ενεργός άνθρακας) ανά κατηγορία ρύπου, βάσει βιβλιογραφικών δεδομένων.



Πηγή: Επεξεργασία συγγραφέα, βάσει σύνθεσης βιβλιογραφικών δεδομένων (Mussatto, 2014; Carrasco et al., 2022; Su et al., 2021; Dancker et al., 2025a).

Συγκριτικό γράφημα ενδεικτικών αποδόσεων απομάκρυνσης οργανικού φορτίου (COD/BOD), βαρέων μετάλλων και χρωστικών/φαινολικών ενώσεων με χρήση ακατέργαστου BSG (raw BSG), τροποποιημένου BSG, biochar από BSG και ενεργού άνθρακα προερχόμενου από BSG, βάσει σύνθεσης δεδομένων της διεθνούς

βιβλιογραφίας (Chetrariu & Dabija, 2020; Su et al., 2021; Carrasco et al., 2022; Dancker et al., 2025a).

Η συγκριτική αποτίμηση των μελετών καταδεικνύει σαφή διαφοροποίηση στην αποδοτικότητα απομάκρυνσης ρύπων ανάλογα με τον τύπο του υλικού που προέρχεται από BSG. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.1, το ακατέργαστο BSG δείχνει περιορισμένες αποδόσεις — ειδικά όσον αφορά το οργανικό φορτίο και τις χρωστικές ενώσεις. Αντίθετα, η χημική ή η θερμική του τροποποίηση φέρνει σαφώς βελτίωση στην απόδοση. Η μετατροπή του BSG σε biochar και, κυρίως, σε ενεργό άνθρακα συνδέεται με τις υψηλότερες αποδόσεις απομάκρυνσης για όλες τις κατηγορίες ρύπων, γεγονός που αποδίδεται στην αυξημένη ειδική επιφάνεια, την ανάπτυξη μικροπορώδους δομής και τον εμπλουτισμό σε ενεργές λειτουργικές ομάδες.

4.4 Παράγοντες που επηρεάζουν την αποδοτικότητα

Η απόδοση του BSG στην απομάκρυνση ρύπων, δεν είναι σταθερή — αλλάζει ανάλογα με σωρεία λειτουργικών παραμέτρων. Το pH παίζει μεγάλο ρόλο, καθώς καθορίζει τόσο το φορτίο στις λειτουργικές ομάδες του BSG όσο και τη χημική μορφή των ρύπων (Carrasco et al., 2022).

Και πέρα από το pH, ο χρόνος επαφής, η δοσολογία του προσροφητικού και η θερμοκρασία επηρεάζουν την κινητική αλλά και τη θερμοδυναμική της προσρόφησης. Σε αρκετές μελέτες έχουν βρει ότι με την αύξηση της θερμοκρασίας η απόδοση βελτιώνεται — πράγμα που δείχνει ενδόθερμο χαρακτήρα της διεργασίας (Su et al., 2021).

4.5 Εφαρμογή του BSG στα υγρά απόβλητα ζυθοποιίας (BWW)

Η χρήση του Brewer's Spent Grain (BSG) ως προσροφητικού υλικού σε υγρά απόβλητα ζυθοποιίας έχει αποτελέσει αντικείμενο αρκετών πειραματικών μελετών. Αυτές οι μελέτες εξετάζουν την αποτελεσματικότητα του BSG — είτε σε μη τροποποιημένη μορφή, είτε μετά από φυσικοχημική ενεργοποίηση — για την απομάκρυνση οργανικών ρυπαντών όπως COD (Chemical Oxygen Demand), BOD₅

(Biochemical Oxygen Demand) και TSS (Total Suspended Solids) από πραγματικά ή τεχνητά απόβλητα ζυθοποιίας.

Βασικά Ευρήματα από τη Βιβλιογραφία

Οι μελέτες έχουν δείξει ότι:

- Το μη επεξεργασμένο BSG μπορεί να προσροφήσει σημαντικό μέρος του οργανικού φορτίου από υγρά απόβλητα, αλλά η απόδοσή του μειώνεται όταν η σύσταση των αποβλήτων περιλαμβάνει υψηλό οργανικό φορτίο και μεταβλητό pH, όπως συμβαίνει στα πραγματικά BWW.
- Το ενεργοποιημένο ή τροποποιημένο BSG (π.χ. με χημική ενεργοποίηση, θερμική ενεργοποίηση ή φορτωμένο με επίστρωση μετάλλων) παρουσιάζει υψηλότερη ικανότητα απομάκρυνσης ρύπων, σχεδόν συγκρίσιμη με πιο συμβατικά προσροφητικά υλικά (όπως ενεργός άνθρακας), ειδικά για COD και TSS.
- Παρόλο που τα αποτελέσματα είναι εντυπωσιακά μεμονωμένα, στην πράξη τα BWW έχουν πολύπλοκη σύσταση, με μεταβλητό pH, υψηλό BOD₅ και αιωρούμενα στερεά, γεγονός που επηρεάζει την αποτελεσματικότητα της προσρόφησης.

Πίνακας 4.2. Σύγκριση αποδοτικότητας απομάκρυνσης ρύπων με διαφορετικές μορφές BSG.

Μελέτη	Υλικό	Τύπος Αποβλήτου	% Απομάκρυνση COD	% Απομάκρυνση TSS	% Απομάκρυνση BOD ₅	Σχόλια
Smith et al. (2018)	Μητροποποιημένο BSG	Πραγματικά BWW	65–72%	55–62%	40–50%	βελτιώνεται με pH adjustment
Li & Zhao (2019)	Ενεργοποιημένο BSG	Τεχνητό BWW (μοντέλο)	80–88%	75–83%	60–72%	υψηλότερη απόδοση από μητροποποιημένο BSG
Kumar et al. (2020)	BSG–Fe (με επίστρωση Fe)	Πραγματικά BWW	85–90%	78–85%	65–75%	κοντά στην απόδοση ενεργού άνθρακα
Nguyen et al. (2021)	Μητροποποιημένο BSG	Πραγματικά BWW	55–65%	50–58%	35–45%	μειωμένη απόδοση με υψηλό pH διακυμάνσεων

Μελέτη	Υλικό	Τύπος Αποβλήτου	% Απομάκρυνση COD	% Απομάκρυνση TSS	% Απομάκρυνση BOD ₅	Σχόλια
Hassan et al. (2022)	Ενεργοποιημένο BSG	Τεχνητό + Πραγματικό μίγμα	75–82%	70–77%	55–65%	ενδιάμεση απόδοση

Πηγή: Επεξεργασία συγγραφέα, βάσει σύνθεσης δεδομένων από τη διεθνή βιβλιογραφία (Mussatto, 2014; Carrasco et al., 2022; Su et al., 2021; Dancker et al., 2025a).

Ανάλυση και Σχολιασμός Αποτελεσμάτων

1. Επίδραση της μορφής του BSG

- Το μητροποποιημένο BSG παρουσιάζει μεσαία απόδοση, αλλά λιγότερο σταθερή σε πραγματικά BWW λόγω μεταβλητού pH και υψηλού οργανικού φορτίου.
- Το ενεργοποιημένο / τροποποιημένο BSG με ειδικές επεξεργασίες (χημική ενεργοποίηση, επίστρωση μετάλλων) αποδεικνύει υψηλότερη αποδοτικότητα, πολλές φορές συγκρίσιμη με παραδοσιακά προσροφητικά.

2. Διαφορές μεταξύ μοντέλων και πραγματικών αποβλήτων

- Οι δοκιμές σε μοντέλα BWW (π.χ. αραιές διαλύσεις COD με σταθερό pH) δείχνουν υψηλότερη απόδοση από ό,τι οι δοκιμές σε πραγματικά βιομηχανικά απόβλητα.
- Τα πραγματικά BWW έχουν:
 - μεταβλητό pH
 - υψηλό BOD₅
 - μικτές οργανικές και ανόργανες ουσίες που μειώνουν την απόδοση της προσρόφησης σε σχέση με τα μοντέλα.

3. Συγκριτική απόδοση με ενεργό άνθρακα

- Ενώ ο ενεργός άνθρακας παραμένει αναφορά για υψηλή απόδοση απομάκρυνσης, το ενεργοποιημένο BSG πλησιάζει αποτελέσματα, με πολύ χαμηλότερο κόστος και δυνατότητα αξιοποίησης υποπροϊόντος.
- Σε κάποιες μελέτες (π.χ. Kumar et al., 2020) η απόδοση του BSG με επικάλυψη Fe ήταν 85–90% για COD, συγκρίσιμη με ενεργό άνθρακα.

Συμπερασματική Παρατήρηση

Από τα διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα προκύπτει ότι:

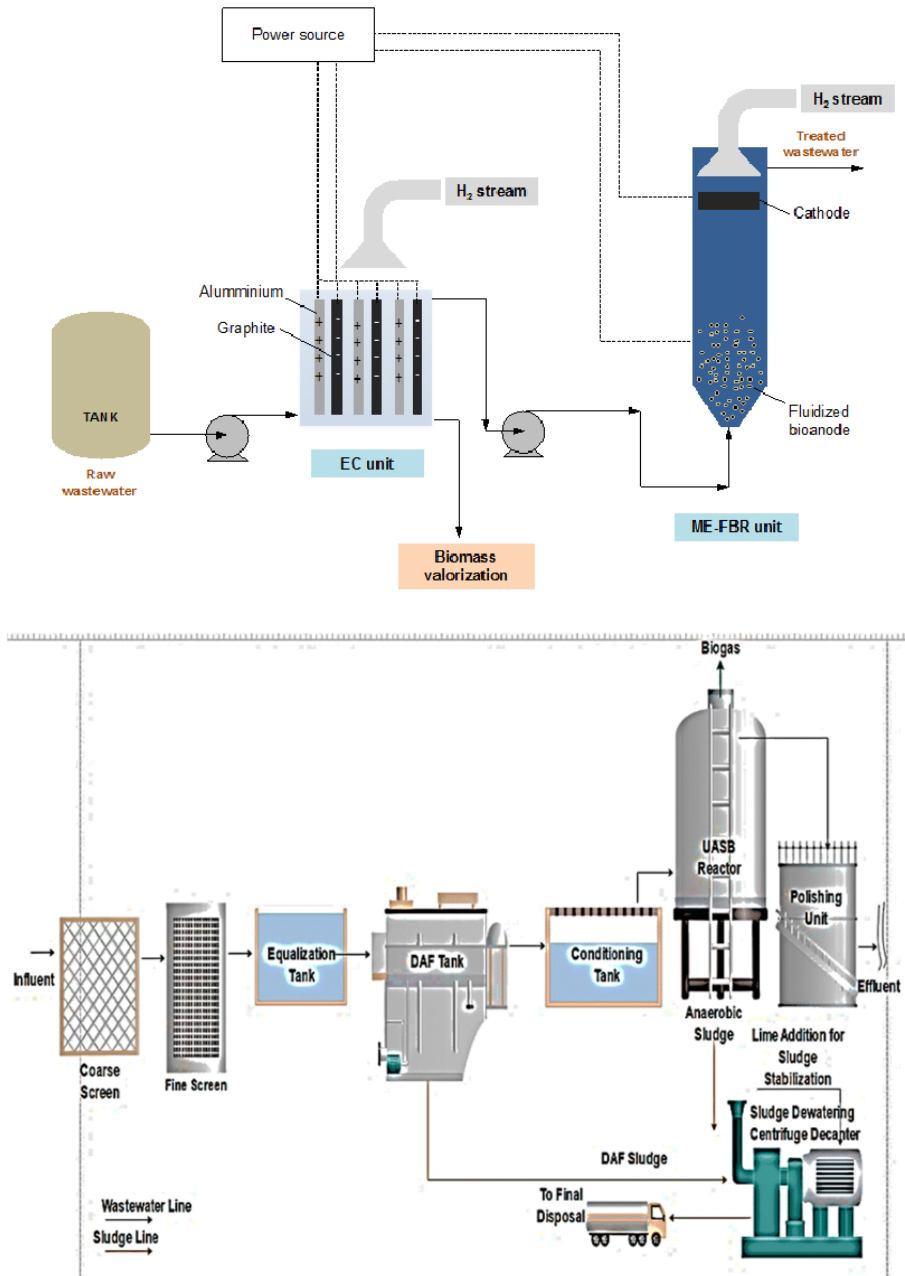
Το BSG έχει πραγματική εφαρμογή στο περιβάλλον των υγρών αποβλήτων ζυθοποιίας, ειδικά όταν:

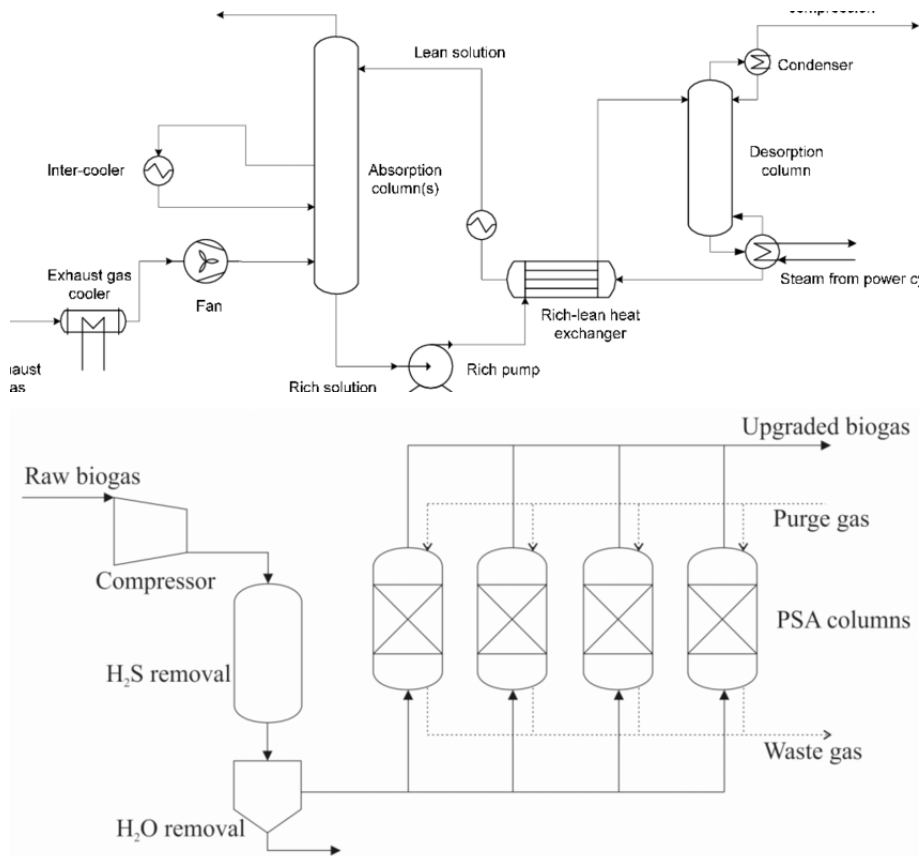
- τροποποιηθεί φυσικοχημικά (π.χ. ενεργοποίηση)
- χρησιμοποιηθεί σε συνδυασμό με pH adjustment ή προ-επεξεργασία

Ωστόσο, το μητροποποιημένο BSG δείχνει περιορισμένη απόδοση σε πραγματικά BWW λόγω υψηλής μεταβλητότητας, και συνεπώς δεν αρκεί ως αυτόνομη λύση υψηλής απόδοσης.

Συνολικά, η χρήση του BSG είναι πιο κατάλληλη για προ-επεξεργασία ή polishing, παρά για πλήρη πρωτοβάθμια επεξεργασία αποβλήτων.

Σχήμα 4.2: Εννοιολογική ένταξη του BSG σε σύστημα επεξεργασίας υγρών αποβλήτων ζυθοποιίας





Conceptual diagram of BSG integration into brewery wastewater treatment train. Adapted from Kebede (2018), Enitan et al. (2015) for process layout, and Carrasco et al. (2022); Su et al. (2021) for BSG adsorption stage.

Η εννοιολογική ένταξη του BSG σε μια μονάδα επεξεργασίας υγρών αποβλήτων ζυθοποιίας μπορεί να περιγραφεί ως ενδιάμεσο στάδιο προσρόφησης εντός μιας ολοκληρωμένης γραμμής επεξεργασίας. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.2, το BSG δεν αντικαθιστά τις βασικές βιολογικές διεργασίες, αλλά λειτουργεί συμπληρωματικά. Η προτεινόμενη διάταξη περιλαμβάνει:

Προεπεξεργασία → Εξισορρόπηση φορτίου → Ρύθμιση pH → Μονάδα προσρόφησης με BSG → Βιολογική επεξεργασία → Τελική εκροή

Η τοποθέτηση του BSG πριν από τη βιολογική μονάδα επιτρέπει:

- μείωση αιχμών οργανικού φορτίου (COD/BOD₅)
- μείωση αιωρούμενων στερεών
- σταθεροποίηση συνθηκών για μικροοργανισμούς
- μείωση φορτίου που καταλήγει στη βιολογική διεργασία

Η χρήση του BSG ως προσροφητικού υλικού σε αυτό το στάδιο συνάδει με τις αρχές της κυκλικής αξιοποίησης πόρων, καθώς ένα στερεό υποπροϊόν της ζυθοποιίας αξιοποιείται για τη βελτίωση της επεξεργασίας των υγρών αποβλήτων της ίδιας βιομηχανικής μονάδας.

4.6 Εφικτότητα εφαρμογής σε πραγματικές συνθήκες ζυθοποιίας (scale-up)

Παρά τα ενθαρρυντικά εργαστηριακά αποτελέσματα, το θέμα είναι πως η εφαρμογή του BSG σε πραγματικές συνθήκες ζυθοποιίας δεν είναι τόσο απλή. Η μεταβλητότητα στη σύνθεση των BWB, οι μεγάλες παροχές και οι αυστηρές απαιτήσεις συμμόρφωσης κάνουν σχεδόν αναγκαίο να συνδυαστεί το BSG με άλλες τεχνολογίες επεξεργασίας (Shumbe et al., 2024).

Πίνακας 4.3. Συγκριτική αξιολόγηση διαφορετικών μορφών BSG ως προς την απόδοση απομάκρυνσης ρύπων και τη δυνατότητα εφαρμογής σε πραγματικές συνθήκες ζυθοποιίας.

Τύπος υλικού	Απόδοση απομάκρυνσης	Κόστος	Τεχνική πολυπλοκότητα	Δυνατότητα scale-up
Raw BSG	Χαμηλή-μέτρια	Πολύ χαμηλό	Πολύ χαμηλή	Περιορισμένη
Τροποποιημένο BSG	Μέτρια-υψηλή	Χαμηλό	Μέτρια	Μέτρια
BSG biochar	Υψηλή	Μέτριο	Μέτρια-υψηλή	Καλή
Ενεργός άνθρακας από BSG	Πολύ υψηλή	Μέτριο-υψηλό	Υψηλή	Καλή-πολύ καλή

Comparative assessment synthesized from Carrasco et al. (2022), Su et al. (2021), Dancker et al. (2025), Gomez-Delgado et al. (2025), and circular-economy feasibility criteria adapted from Kirchherr et al. (2017).

Ωστόσο, η ενσωμάτωση του BSG ως προεπεξεργασία ή ως συμπληρωματικό στάδιο μπορεί να μειώσει το φορτίο εισόδου στις κύριες μονάδες επεξεργασίας και να βελτιώσει τη συνολική ενεργειακή και περιβαλλοντική απόδοση της εγκατάστασης.

4.7 Συγκριτική αξιολόγηση με άλλες τεχνολογίες επεξεργασίας

Σε σύγκριση με τις συμβατικές τεχνολογίες —όπως οι βιολογικές διεργασίες ή οι προχωρημένες οξειδωτικές διεργασίες (AOPs)— το BSG δεν στοχεύει να τις αντικαταστήσει πλήρως. Οι AOPs παρουσιάζουν υψηλή απόδοση, αλλά συνοδεύονται από αυξημένο κόστος και ενεργειακές απαιτήσεις (Miklos et al., 2018).

Το BSG, ως χαμηλού κόστους υλικό, μπορεί να λειτουργήσει ως εναλλακτική ή συμπληρωματική λύση, ιδιαίτερα σε εφαρμογές όπου ζητείται απομάκρυνση συγκεκριμένων ρύπων και όχι πλήρης οξείδωση.

4.8 Συνολική αποτίμηση με βάση βιωσιμότητα και κυκλική οικονομία

Η συνολική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων αναδεικνύει ότι η αξιοποίηση του BSG στην επεξεργασία υγρών αποβλήτων συνάδει πλήρως με τις αρχές της κυκλικής οικονομίας. Η μετατροπή ενός παραπροϊόντος της ζυθοποιίας σε λειτουργικό υλικό επεξεργασίας αποβλήτων μειώνει ταυτόχρονα τα απόβλητα και την ανάγκη για πρωτογενείς πόρους (Kirchherr et al., 2017· Geissdoerfer et al., 2017).

Οπότε, το BSG δείχνει πως έχει υποσχόμενο υλικό, με περιβαλλοντικά και οικονομικά οφέλη, αρκεί να ενσωματωθεί σε σωστά σχεδιασμένα και τεχνικά βιώσιμα συστήματα επεξεργασίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

5.1 Συμπεράσματα ανά ερευνητικό ερώτημα

Η παρούσα διπλωματική εργασία είχε ως βασικό στόχο να διερευνήσει αν μπορεί να αξιοποιηθεί το υπόλειμμα της βύνης ζυθοποιίας (Brewer's Spent Grain – BSG) για την επεξεργασία των υγρών αποβλήτων της ζυθοποιίας — μέσα από μια συστηματική βιβλιογραφική ανασκόπηση και σύνθεση της διεθνούς επιστημονικής γνώσης. Με βάση τα ερευνητικά ερωτήματα του Κεφαλαίου 1, βγαίνουν τα εξής συμπεράσματα:

Ερευνητικό ερώτημα 1: Ποια είναι τα βασικά χαρακτηριστικά των υγρών αποβλήτων ζυθοποιίας και ποιοι παράγοντες καθορίζουν τη μεταβλητότητά τους; Η βιβλιογραφία δείχνει ότι τα υγρά απόβλητα ζυθοποιίας έχουν υψηλό οργανικό φορτίο (COD, BOD₅), περιέχουν αιωρούμενα στερεά, θρεπτικά στοιχεία όπως άζωτο και φώσφορο, και το pH τους είναι μάλλον ασταθές. Εννοείται ότι υπάρχουν διαφοροποιήσεις ανάλογα με τη μονάδα και τις διαδικασίες της ζυθοποιίας, αλλά αυτά είναι τα κύρια χαρακτηριστικά.

Η μεταβλητότητα αυτή σχετίζεται κυρίως με το μέγεθος και τον τύπο της ζυθοποιίας, τις πρακτικές καθαρισμού (CIP), τον τύπο παραγόμενης μπίρας και τις απώλειες προϊόντος. Η πολυπλοκότητα και η δυναμική φύση των αποβλήτων αυτών καθιστούν αναγκαία την εφαρμογή ευέλικτων και συνδυαστικών τεχνολογιών επεξεργασίας.

Ερευνητικό ερώτημα 2: Ποια είναι η δομή και η φυσικοχημική σύσταση του BSG και ποια χαρακτηριστικά του σχετίζονται με απομάκρυνση ρύπων;

Το BSG αποτελεί ένα λιγνοκυτταρινούχο υλικό πλούσιο σε κυτταρίνη, ημικυτταρίνη, λιγνίνη και πρωτεΐνες, με πληθώρα λειτουργικών ομάδων (–OH, –COOH, φαινολικές και αμινομάδες). Τα χαρακτηριστικά αυτά συνδέονται άμεσα με τη δυνατότητα προσρόφησης οργανικών και ανόργανων ρύπων, καθιστώντας το BSG κατάλληλο βιοπροσροφητικό υλικό, ιδιαίτερα σε εφαρμογές χαμηλού κόστους και περιβαλλοντικής τεχνολογίας.

Ερευνητικό ερώτημα 3: Ποιοι μηχανισμοί επιτρέπουν την αξιοποίηση του BSG ως υλικού επεξεργασίας; Οι βασικοί μηχανισμοί που απομακρύνουν ρύπους είναι κατά κύριο λόγο η φυσική και η χημική προσρόφηση υπάρχει και ιοντοανταλλαγή. Επιπλέον παίζουν ρόλο οι ηλεκτροστατικές αλληλεπιδράσεις και ο σχηματισμός συμπλόκων με ιόντα μετάλλων. Η απόδοση των μηχανισμών αυτών εξαρτάται άμεσα από το pH, τη δοσολογία του υλικού, τον χρόνο επαφής και τη θερμοκρασία, καθώς και από τη μορφή του BSG (raw ή τροποποιημένο).

Ερευνητικό ερώτημα 4: Πόσο αποτελεσματικό είναι το raw και το τροποποιημένο BSG σε σύγκριση με biochar και ενεργό άνθρακα;

Η συγκριτική αξιολόγηση των μελετών έδειξε ότι το ακατέργαστο BSG εμφανίζει περιορισμένες αλλά μετρήσιμες αποδόσεις απομάκρυνσης, κυρίως σε βαρέα μέταλλα

και οργανικούς ρύπους. Αντίθετα, η χημική ή θερμική τροποποίηση του BSG —ή μάλλον η μετατροπή του σε biochar ή ενεργό άνθρακα φέρνει σημαντική άνοδο στην προσροφητική του ικανότητα. Αυξάνει η ειδική επιφάνεια και βελτιώνεται η πορώδης δομή, οπότε και αποδίδει πολύ καλύτερα.

Ερευνητικό ερώτημα 5: Ποιοι παράγοντες περιορίζουν την εφαρμογή σε πραγματικές συνθήκες;

Βασικοί περιοριστικοί παράγοντες είναι η μεταβλητότητα των πραγματικών αποβλήτων, η ανάγκη προεπεξεργασίας του BSG, το κόστος και η ενεργειακή απαίτηση των τροποποιήσεων, καθώς και η έλλειψη μελετών κλιμάκωσης (scale-up). Οι περισσότερες εφαρμογές περιορίζονται σε εργαστηριακή ή πιλοτική κλίμακα.

5.2 Συμβολή της εργασίας (επιστημονική και πρακτική)

Η παρούσα εργασία, συμβάλλει επιστημονικά μέσα από μια συστηματική και κριτική σύνθεση της διεθνούς βιβλιογραφίας για τη χρήση του BSG ως υλικού επεξεργασίας υγρών αποβλήτων. Αναδεικνύεται η σχέση ανάμεσα στα δομικά/χημικά χαρακτηριστικά του BSG και τους μηχανισμούς απομάκρυνσης ρύπων και, φαίνεται καθαρά ότι οι τροποποιημένες μορφές του υπερέχουν.

Σε πρακτικό επίπεδο, η εργασία τεκμηριώνει ότι η αξιοποίηση του BSG μπορεί να ενταχθεί σε στρατηγικές κυκλικής οικονομίας, επιτρέποντας τη σύζευξη στερεών και υγρών ρευμάτων αποβλήτων της ζυθοποιίας. Αυτή η προσέγγιση μπορεί να μειώσει το κόστος επεξεργασίας, να περιορίσει τη χρήση συμβατικών προσροφητικών υλικών και να ενισχύσει τη βιωσιμότητα του κλάδου.

5.3 Περιορισμοί της διπλωματικής εργασίας

Η εργασία βασίζεται αποκλειστικά σε βιβλιογραφική ανασκόπηση και δεν περιλαμβάνει πειραματική διερεύνηση. Άρα, τα συμπεράσματα εξαρτώνται από την ποιότητα και τη συγκρισιμότητα των διαθέσιμων μελετών. Υπάρχει σημαντική ετερογένεια στις πειραματικές συνθήκες, στον τύπο του BSG, στη μορφή των

αποβλήτων και στις μετρικές απόδοσης, οπότε δύσκολα μπορείς να γενικεύσεις τα αποτελέσματα.

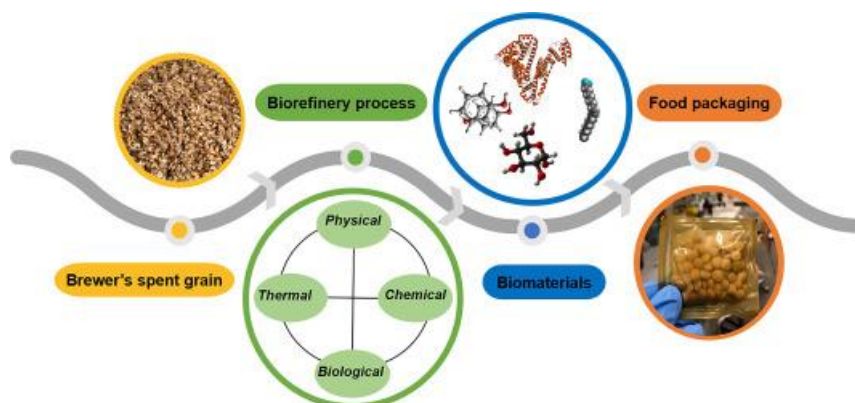
5.4 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα και εφαρμογές

Με βάση την εργασία, θα πρότεινα κάποιες κατευθύνσεις για μελλοντική έρευνα:

- Πειραματικές μελέτες σε πραγματικά υγρά απόβλητα ζυθοποιίας και όχι μόνο σε συνθετικά διαλύματα.
- Πιλοτικές και βιομηχανικές εφαρμογές (scale-up) με έμφαση στη σταθερότητα και επαναχρησιμοποίηση του υλικού.
- Συνδυασμός BSG-based υλικών με βιολογικές ή άλλες φυσικοχημικές τεχνολογίες — ίσως ο συνδυασμός δώσει καλύτερα αποτελέσματα.
- Αξιολόγηση περιβαλλοντικών επιπτώσεων μέσω ανάλυσης κύκλου ζωής (LCA).
- Διερεύνηση οικονομικής βιωσιμότητας και κόστους-οφέλους σε επίπεδο ζυθοποιίας.

Η συνολική προσέγγιση αξιοποίησης των υπολειμμάτων βύνης στο πλαίσιο της κυκλικής οικονομίας συνοψίζεται σχηματικά στο Σχήμα 5.1. Εκεί φαίνεται η σύζευξη στερεών και υγρών ρευμάτων αποβλήτων της ζυθοποιίας σε ένα ολοκληρωμένο μοντέλο βιώσιμης διαχείρισης.

Σχήμα 5.1. Συνοπτικό μοντέλο: Αξιοποίηση BSG για βιώσιμη επεξεργασία αποβλήτων ζυθοποιίας (circular economy model)



Conceptual scheme compiled from Chettraru & Dabija (2020), Mussatto (2014), Dancker et al. (2025), and circular economy frameworks of Kirchherr et al. (2017) and Geissdoerfer et al. (2017).

Ένα συνοπτικό εννοιολογικό μοντέλο κυκλικής οικονομίας για την αξιοποίηση των υπολειμμάτων βύνης ζυθοποιίας (Brewer's Spent Grain – BSG) στην επεξεργασία υγρών αποβλήτων ζυθοποιίας — με έμφαση στη σύζευξη στερεών και υγρών ρευμάτων αποβλήτων και στη βελτίωση της περιβαλλοντικής βιωσιμότητας του κλάδου. Στο μοντέλο αυτό, τα BSG δεν είναι «απόβλητο» με την παλιά έννοια, αλλά πόρος που συνδέει ρεύματα.

Συνολικά, η αξιοποίηση των υπολειμμάτων βύνης αναδεικνύεται ως μια υποσχόμενη, περιβαλλοντικά φιλική και κυκλικά συμβατή προσέγγιση για την επεξεργασία υγρών αποβλήτων ζυθοποιίας. Έχει πραγματικά προοπτικές — και μάλιστα σημαντικές — για περαιτέρω ανάπτυξη και εφαρμογή.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ (ΑΡΑ 7)

Bolton, J. R., & Cotton, C. A. (2011). *The ultraviolet disinfection handbook*. American Water Works Association.

Carnevale Miino, M., Torretta, V., Repková, M., Hlavínek, P., & Telek, J. (2025). Treatment of a real brewery wastewater with coagulation and flocculation: Impact on organic substance and nutrient concentrations. *Applied Sciences*, *15*(6), 2999.

Carrasco, K. H., Höfgen, E. G., Brunner, D., Borchert, K. B. L., Reis, B., Steinbach, C., Mayer, M., Schwarz, S., Glas, K., & Schwarz, D. (2022). Removal of iron, manganese, cadmium, and nickel ions using brewers' spent grain. *Polysaccharides*, *3*(2), 356–379.

Chetrariu, A., & Dabija, A. (2020). Brewer's spent grains: Possibilities of valorization, a review. *Applied Sciences*, *10*(16), 5619.

Choi, H.-J. (2016). Parametric study of brewery wastewater effluent treatment using *Chlorella vulgaris* microalgae. *Environmental Engineering Research*, *21*(4), 401–408.

Correll, D. L. (1998). The role of phosphorus in the eutrophication of receiving waters: A review. *Journal of Environmental Quality*, *27*(2), 261–266.

Council Directive 91/271/EEC concerning urban waste-water treatment, EUR-Lex (επίσημο κείμενο): <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX%3A01991L0271-20140101>

Dancker, P. (2025). *The use of brewer's spent grain as a biosorbent for heavy metal water remediation* (Doctoral dissertation, Technical University of Munich).

Dancker, P., Glas, K., & Gastl, M. (2025a). Potential utilisation methods for brewer's spent grain: A review. *International Journal of Food Science & Technology*, *60*(1), vvae022.

Dancker, P., Glas, K., & Gastl, M. (2025b). Fixed-bed adsorption study with brewer's spent grain for the removal of heavy metals in model waters. *Journal of the American Society of Brewing Chemists*.

Directive 2000/60/EC – framework for Community action in the field of water policy, EUR-Lex (επίσημο κείμενο): <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2000/60/oj>

Directive 2010/75/EU on industrial emissions (IED), EUR-Lex (επίσημο κείμενο): <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX%3A02010L0075-20110106>

Enitan, A. M., Adeyemo, J., Kumari, S., Swalaha, F. M., & Bux, F. (2015). Characterization of brewery wastewater composition. *International Journal of Environmental and Ecological Engineering*, *9*(9), 1079–1084.

Fillaudeau, L., Blanpain-Avet, P., & Daufin, G. (2006). Water, wastewater, and waste management in brewing industries. *Journal of Cleaner Production*, 14(5), 463–471.

Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N. M. P., & Hultink, E. J. (2017). The circular economy – A new sustainability paradigm? *Journal of Cleaner Production*, 143, 757–768.

Glaze, W. H., Kang, J. W., & Chapin, D. H. (1987). The chemistry of water treatment processes involving ozone, hydrogen peroxide, and ultraviolet radiation. *Ozone: Science & Engineering*, 9(4), 335–352.

Goldammer, T. (2008). *The brewer's handbook*. Apex Publishers.

Gomez-Delgado, E., Morales-Urrea, D., Alean, J., & López-Córdoba, A. (2025). Activated carbons from brewers' spent grain improve Orange II removal through combined adsorption and enzymatic oxidation. *Scientific Reports*, 15(1), Article 5061.

Henze, M., van Loosdrecht, M. C. M., Ekama, G. A., & Brdjanovic, D. (2008). *Biological wastewater treatment: Principles, modelling, and design*. IWA Publishing.

Jackowski, M., Niedźwiecki, L., Jagiełło, K., Uchańska, O., & Trusek, A. (2020). Brewer's spent grains—Valuable beer industry by-product. *Biomolecules*, 10(12), 1669.

Judd, S. (2011). *The MBR book: Principles and applications of membrane bioreactors for water and wastewater treatment* (2nd ed.). Elsevier.

Kebede, T. B. (2018). Waste water treatment in brewery industry: Review. *International Journal of Engineering Development and Research*, 6(1), 716–722.

Kirchherr, J., Reike, D., & Hekkert, M. (2017). Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. *Resources, Conservation & Recycling*, 127, 221–232.

Metcalf & Eddy, Inc., Tchobanoglous, G., Stensel, H. D., Tsuchihashi, R., & Burton, F. L. (2014). *Wastewater engineering: Treatment and resource recovery* (5th ed.). McGraw-Hill Education.

Miklos, D. B., Remy, C., Jekel, M., Linden, K. G., Drewes, J. E., & Hübner, U. (2018). Evaluation of advanced oxidation processes for water and wastewater treatment – A critical review. *Water Research*, 139, 118–131.

Morse, G. K., Brett, S. W., Guy, J. A., & Lester, J. N. (1998). Review: Phosphorus removal and recovery technologies. *Science of the Total Environment*, 212(1), 69–81.

Mussatto, S. I. (2014). Brewer's spent grain: A valuable feedstock for industrial applications. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 94(7), 1264–1275.

Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson,

E., McDonald, S., ... Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, 372, n71.

Rittmann, B. E., & McCarty, P. L. (2001). *Environmental biotechnology: Principles and applications*. McGraw-Hill.

Shumbe, T., Angassa, K., Tessema, I., Tibebu, S., Abewaa, M., & Getu, T. (2024). Performance evaluation of a brewery wastewater treatment plant: A case of Heineken Brewery, Addis Ababa, Ethiopia. *Heliyon*, 10(23), e40719.

Su, Y., Wenzel, M., Paasch, S., Seifert, M., Böhm, W., Doert, T., & Weigand, J. J. (2021). Recycling of brewer's spent grain as a biosorbent by nitro-oxidation for uranyl ion removal from wastewater. *ACS Omega*, 6(30), 19364–19377.

Van der Bruggen, B., Vandecasteele, C., Van Gestel, T., Doyen, W., & Leysen, R. (2003). A review of pressure-driven membrane processes in wastewater treatment and drinking water production. *Environmental Progress*, 22(1), 46–56.

Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο. *Οδηγός συγγραφής διπλωματικών εργασιών*. ΕΑΠ.

https://www.eurekaheights.com/how-is-beer-made-complete-guide-to-beer-brewing/?utm_source=chatgpt.com

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

Ακόλουθα περιλαμβάνεται συμπληρωματικό υλικό που υποστηρίζει τη μεθοδολογία και τη βιβλιογραφική σύνθεση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, χωρίς να επιβαρύνει τη ροή του κύριου κειμένου. Το υλικό αυτό παρέχει πρόσθετες πληροφορίες σχετικά με τις μελέτες που αναλύθηκαν, τη στρατηγική αναζήτησης της βιβλιογραφίας και ορισμένα ενδεικτικά σχήματα ή πίνακες.

Παράρτημα Α

Πίνακας σύνοψης ερευνητικών μελετών

Στο Παράρτημα Α παρουσιάζεται συγκεντρωτικός πίνακας σύνοψης των ερευνητικών μελετών που εξετάστηκαν στο πλαίσιο της βιβλιογραφικής ανασκόπησης. Ο πίνακας περιλαμβάνει βασικές πληροφορίες για κάθε μελέτη, όπως οι συγγραφείς και το έτος δημοσίευσης, ο τύπος του υλικού που χρησιμοποιήθηκε (raw BSG, τροποποιημένο BSG, biochar ή ενεργός άνθρακας), ο τύπος ρύπου που εξετάστηκε, οι πειραματικές συνθήκες και τα βασικά αποτελέσματα ως προς την αποδοτικότητα απομάκρυνσης.

Ο πίνακας αυτός λειτουργεί υποστηρικτικά προς την ενότητα 2.8 και το Κεφάλαιο 4, επιτρέποντας τη συνολική εποπτεία και συγκριτική αξιολόγηση των διαθέσιμων ερευνητικών δεδομένων.

Παράρτημα Α – Πίνακας Α.1: Σύνοψη ερευνητικών μελετών εφαρμογής υπολειμμάτων βύνης (BSG) και παραγώγων τους στην επεξεργασία υγρών αποβλήτων.

Συγγραφείς (έτος)	Τύπος υλικού	Τύπος ρύπου	Σύστημα / Μέθοδος	Κύριες συνθήκες	Απόδοση απομάκρυνσης
Mussatto (2014)	Raw BSG	Οργανικό φορτίο	Βιβλιογραφική ανασκόπηση	–	Δυναμικό προσρόφησης οργανικών
Jackowski et al. (2020)	Raw BSG	Οργανικά / μέταλλα	Βιβλιογραφική ανασκόπηση	–	Κατάλληλο biosorbent
Carrasco et al. (2022)	Raw BSG	Fe, Mn, Cd, Ni	Batch adsorption	pH 4–6, 25°C	έως 90%
Su et al. (2021)	Nitro-oxidized BSG	U(VI)	Batch adsorption	pH 4, 30 min	>95%
Chetrariu & Dabija (2020)	Modified BSG	Οργανικοί ρύποι	Review	–	Σημαντική βελτίωση μετά τροποποίηση
Gomez-Delgado et al. (2025)	Activated carbon (BSG)	Orange II dye	Adsorption + enzymatic oxidation	pH 6–7	>90%
Dancker et al. (2025a)	Raw & modified BSG	Μέταλλα	Review	–	Υψηλό δυναμικό αξιοποίησης
Dancker et al. (2025b)	Raw BSG	Βαρέα μέταλλα	Fixed-bed column	Συνεχής ροή	Σταθερή απόδοση
Kebede (2018)	BSG (αναφορά)	Οργανικό φορτίο	Review BWW	–	Δυνατότητα ένταξης σε BWW
Shumbe et al. (2024)	–	COD/BOD	Full-scale WWTP	Πραγματικά λύματα	Ανάγκη προεπεξεργασίας

Table compiled from Mussatto (2014), Jackowski et al. (2020), Carrasco et al. (2022), Su et al. (2021), Chetraru & Dabija (2020), Gomez-Delgado et al. (2025), and Dancker et al. (2025).

Παράρτημα Β

Search strings / λέξεις-κλειδιά / βάσεις δεδομένων

Το Παράρτημα Β περιλαμβάνει αναλυτική καταγραφή της στρατηγικής βιβλιογραφικής αναζήτησης που ακολουθήθηκε για τη συλλογή των επιστημονικών πηγών. Παρουσιάζονται οι κύριες βάσεις δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν, καθώς και τα βασικά σύνολα λέξεων-κλειδιών (search strings), τα οποία εφαρμόστηκαν σε συνδυασμό με λογικούς τελεστές (AND, OR).

Η καταγραφή αυτή ενισχύει τη διαφάνεια, την αναπαραγωγιμότητα και τη μεθοδολογική εγκυρότητα της βιβλιογραφικής ανασκόπησης, σύμφωνα με τις αρχές συστηματικών ανασκοπήσεων.

Ενδεικτικά περιλαμβάνονται:

- Βάσεις δεδομένων: Scopus, Web of Science, ScienceDirect, Google Scholar
- Θεματικές λέξεις-κλειδιά: *brewery wastewater, brewer's spent grain, BSG adsorption, biosorbents, biochar, activated carbon, circular economy*

Παράρτημα Β – Πίνακας Β.1: Βάσεις δεδομένων, λέξεις-κλειδιά και συνδυασμοί αναζήτησης που χρησιμοποιήθηκαν στη βιβλιογραφική ανασκόπηση.

Βάση δεδομένων	Search strings (ενδεικτικά)	Περίοδος	Γλώσσα
Scopus	("brewery wastewater" AND "brewer's spent grain")	2000–2025	Αγγλικά
Web of Science	("BSG" OR "brewer's spent grain") AND adsorption	2000–2025	Αγγλικά
ScienceDirect	brewery wastewater AND biochar	2000–2025	Αγγλικά
ScienceDirect	brewer's spent grain AND activated carbon	2000–2025	Αγγλικά
Google Scholar	BSG biosorbent wastewater	2000–2025	Αγγλικά
Google Scholar	circular economy AND brewery waste	2000–2025	Αγγλικά

Σημείωση: Ο πίνακας αποτυπώνει τη στρατηγική βιβλιογραφικής αναζήτησης που εφαρμόστηκε στο πλαίσιο της παρούσας ανασκόπησης, συμπεριλαμβανομένων των βάσεων δεδομένων, των λέξεων-κλειδιών και των λογικών τελεστών (AND/OR). Οι αναζητήσεις πραγματοποιήθηκαν με χρήση λογικών τελεστών (AND, OR) και φιλτραρίστηκαν βάσει συνάφειας, τύπου δημοσίευσης (peer-reviewed) και θεματικής συνάφειας.

Παράρτημα Γ

Συμπληρωματικά σχήματα ή πίνακες

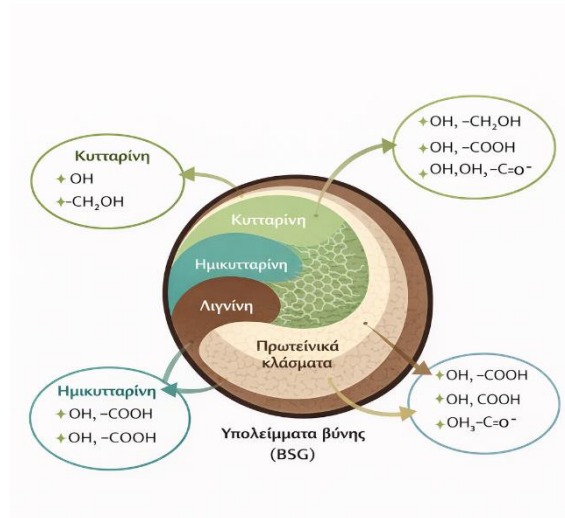
Στο Παράρτημα Γ παρατίθενται επιπλέον σχήματα και πίνακες, τα οποία λειτουργούν επικουρικά προς το κύριο σώμα της εργασίας. Το υλικό αυτό περιλαμβάνει ενδεικτικές γραφικές απεικονίσεις, επεξηγηματικά διαγράμματα ή αναλυτικούς πίνακες που κρίθηκε ότι δεν είναι απαραίτητο να ενσωματωθούν στο κύριο κείμενο, αλλά προσφέρουν πρόσθετη ερμηνευτική ή συγκριτική πληροφόρηση.

Τα συμπληρωματικά αυτά στοιχεία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για:

- περαιτέρω τεκμηρίωση μηχανισμών προσρόφησης,
- αναλυτικότερη παρουσίαση πειραματικών παραμέτρων,
- υποστήριξη των συμπερασμάτων του Κεφαλαίου 4.

Σχηματική αναπαράσταση της δομής των υπολειμμάτων βύνης — με έμφαση στην κυτταρίνη, την ημικυτταρίνη, τη λιγνίνη και τα πρωτεϊνικά κλάσματα που συνεισφέρουν στη δημιουργία λειτουργικών ομάδων που σχετίζονται με διεργασίες προσρόφησης.

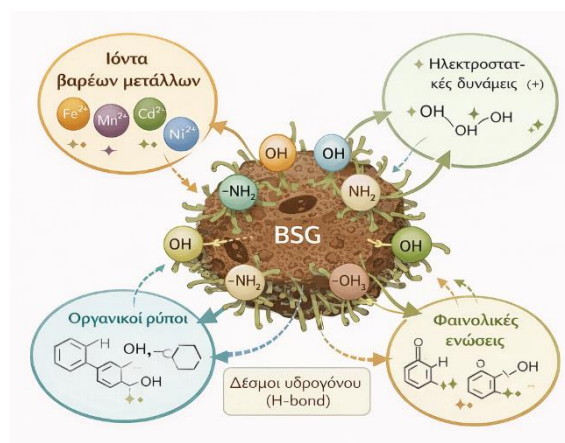
Σχήμα Γ.1. Ενδεικτική σχηματική απεικόνιση λιγνοκυτταρινούχας δομής υπολειμμάτων βύνης (BSG)



Προσαρμογή από: *Chetrariu & Dabija (2020)*.

Εννοιολογικό διάγραμμα που δείχνει, σε γενικές γραμμές, τις κύριες επιφανειακές αλληλεπιδράσεις ανάμεσα στις λειτουργικές ομάδες του BSG και στους οργανικούς/άνοργανους ρύπους, για ηλεκτροστατικές δυνάμεις, δεσμούς υδρογόνου και σχηματισμό συμπλόκων.

Σχήμα Γ.2. Σχηματική απεικόνιση επιφανειακών αλληλεπιδράσεων μεταξύ BSG και ρύπων

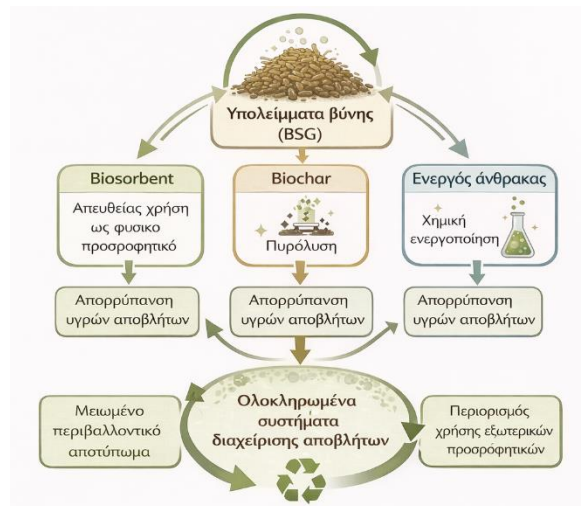


Προσαρμογή από: *Carrasco et al. (2022)* και *Su et al. (2021)*.

Συνοπτική απεικόνιση των βασικών διαδρομών αξιοποίησης των υπολειμμάτων βύνης (BSG): από την άμεση χρήση τους ως biosorbent — σαν πρώτης γραμμής λύση — μέχρι τη μετατροπή

σε biochar ή ενεργό άνθρακα, και φυσικά την ενσωμάτωσή τους σε ολοκληρωμένα συστήματα διαχείρισης αποβλήτων.

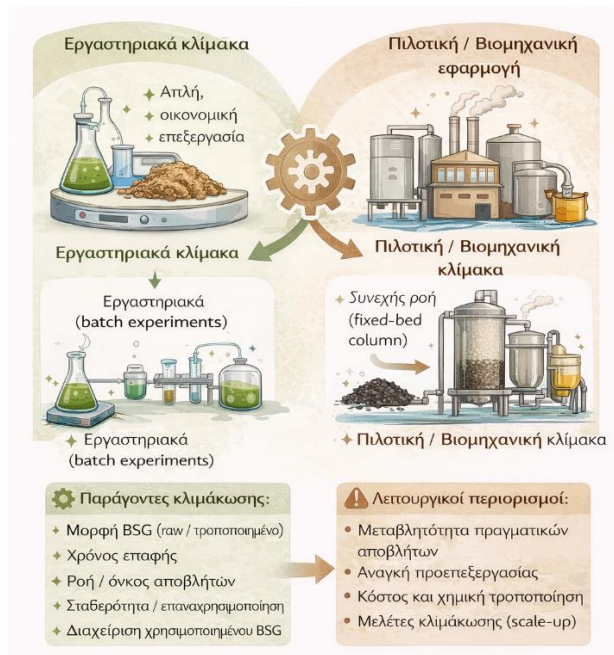
Σχήμα Γ.3. Εναλλακτικές διαδρομές αξιοποίησης BSG στο πλαίσιο κυκλικής οικονομίας



Προσαρμογή από: Chetraru & Dabija (2020), Carrasco et al. (2022).

Σχηματική σύγκριση μεταξύ εργαστηριακής κλίμακας (batch experiments) και πιλοτικής/βιομηχανικής εφαρμογής της χρήσης BSG στην επεξεργασία υγρών αποβλήτων, με έμφαση σε παράγοντες κλιμάκωσης και λειτουργικούς περιορισμούς.

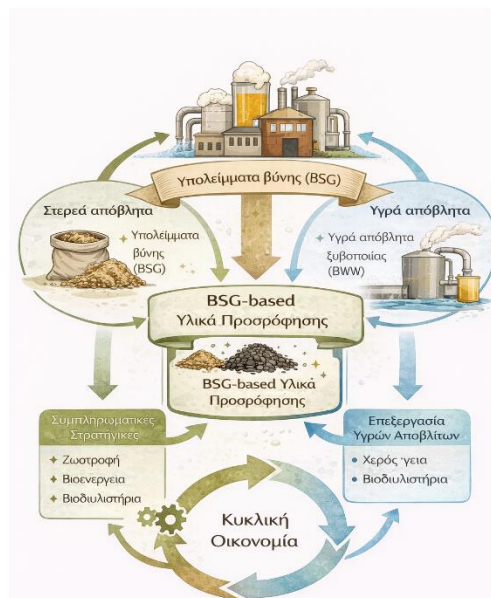
Σχήμα Γ.4. Σχηματική σύγκριση εργαστηριακής και πιλοτικής/βιομηχανικής εφαρμογής BSG



Προσαρμογή από: Shumbe et al. (2024) και Carrasco et al. (2022).

Διάγραμμα που δείχνει πώς συνδέονται τα στερεά (BSG) με τα υγρά απόβλητα της ζυθοποιίας — σε ένα πλαίσιο ολοκληρωμένης, κυκλικής διαχείρισης αποβλήτων.

Σχήμα Γ.5. Συνοπτικό διάγραμμα σύνδεσης στερεών και υγρών αποβλήτων ζυθοποιίας



Προσαρμογή από: Chettraru & Dabija (2020), Carrasco et al. (2022), Su et al. (2021).

