



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

**ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος**

Φυσικά συστήματα διαχείρισης και επεξεργασίας νερού και η  
σύνδεση τους με το πλέγμα Νερού-Ενέργειας-Τροφίμων-  
Οικοσυστημάτων (Water-Energy-Food-Ecosystem Nexus)

Διπλωματική εργασία : Αποστολίδη Ευαγγελία

Επιβλέπων : Νουτσόπουλος Κωνσταντίνος, Καθηγητής ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2025

## Ευχαριστίες

Ολοκληρώνοντας την παρούσα διπλωματική εργασία, θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στον επιβλέποντα καθηγητή, κ. Κωνσταντίνο Νουτσόπουλο, Καθηγητή του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, για την επίβλεψη της εργασίας αυτής. Η συνεργασία μας υπήρξε εξαιρετική και η βοήθεια που μου παρείχε καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης ήταν καθοριστικής σημασίας για το τελικό αποτέλεσμα.

Ακόμη, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την υποψήφια διδάκτορα Ανδριανή Γαλάνη και την υποψήφια διδάκτορα Αλεξάνδρα Τσάτσου για την αμέριστη βοήθεια και υποστήριξή τους, καθώς και για τη συνεχή καθοδήγηση που μου προσέφεραν σε όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου και τις αγαπημένες μου φίλες για τη συνεχή τους υποστήριξη και τη βοήθειά τους στη διόρθωση της εργασίας, όποτε τη χρειαζόμουν.

## Περίληψη

Η συνεχής αύξηση του παγκόσμιου πληθυσμού, σε συνδυασμό με τις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής, καθιστά επιτακτική την ανάγκη ορθολογικής διαχείρισης και επαναχρησιμοποίησης των υδατικών πόρων, μέσα από την αναζήτηση οικονομικά αποδοτικών και περιβαλλοντικά φιλικών μεθόδων επεξεργασίας. Η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου επεξεργασίας εξαρτάται από τον τύπο του νερού, καθώς κάθε κατηγορία παρουσιάζει διαφορετικά χαρακτηριστικά και απαιτήσεις. Στη συνέχεια της εργασίας, παρουσιάζονται αναλυτικά τα χαρακτηριστικά των βασικών τύπων νερού, όπως το βρόχινο νερό, τα όμβρια ύδατα και τα αστικά λύματα, τα οποία διακρίνονται περαιτέρω σε γκρίζα και μαύρα ύδατα. Για την αποτελεσματική επεξεργασία κάθε τύπου νερού, με στόχο την κάλυψη των προβλεπόμενων νομοθετικών απαιτήσεων αλλά και την ενίσχυση της οικολογικής ισορροπίας, εφαρμόζονται οι Φύσει Βασισμένες Λύσεις (Nature-Based Solutions – NBS). Οι λύσεις αυτές περιλαμβάνουν ποικίλα συστήματα, όπως πράσινες στέγες, συστήματα συλλογής όμβριων υδάτων, πράσινους τοίχους, τεχνητούς υδροβιότοπους, συστήματα βιοκατακράτησης και κήπους βροχής. Ορισμένα συστήματα επικεντρώνονται κυρίως στη διαχείριση, ενώ άλλα εξειδικεύονται στην επεξεργασία των υδάτων. Κάθε σύστημα φέρει διαφορετικά τεχνικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά, επομένως δεν είναι κατάλληλο για όλους τους τύπους νερού. Η επιλογή και εφαρμογή τους εξετάζεται αναλυτικά στα επόμενα κεφάλαια της εργασίας. Πέρα από την επεξεργασία και διαχείριση, των υδάτων, τα NBS προσφέρουν πληθώρα συμπληρωματικών ωφελειών, όπως η ενίσχυση της βιοποικιλότητας, η παραγωγή τροφίμων και η βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας μέσω θερμομόνωσης. Τα πολλαπλά αυτά οφέλη αλληλοεπιδρούν και ενισχύουν το ένα το άλλο, διαμορφώνοντας το πλέγμα Νερού-Ενέργειας-Τροφίμων-Οικοσυστημάτων (Water-Energy-Food-Ecosystem Nexus – WEFEN). Το πλέγμα αυτό σχετίζεται άμεσα με τα NBS, καθώς κάθε ένα σύστημα από αυτά ενισχύει με διαφορετικό τρόπο τους επιμέρους τομείς του πλέγματος. Η σύνδεση του WEFEN Nexus με τα επιμέρους NBS συστήματα αναλύεται λεπτομερώς στην παρούσα διπλωματική εργασία.

## **Abstract**

The continuous growth of the global population, combined with the impacts of climate change, makes the rational management and reuse of water resources imperative. This requires the adoption of economically efficient and environmentally friendly treatment methods. The selection of an appropriate treatment method depends on the type of water, as each category has different characteristics and processing requirements. In the following sections of this thesis, the specific features of key water types are analyzed, such as rainwater, stormwater runoff, and urban wastewater, the latter of which is further divided into greywater and blackwater. To ensure the effective treatment of each water type, both to comply with the relevant legal requirements and to support ecological balance, Nature-Based Solutions (NBS) are applied. These solutions encompass a variety of systems, including green roofs, stormwater harvesting systems, green walls, constructed wetlands, bioretention systems, and rain gardens. Some of these systems primarily focus on water management, while others are specialized in water treatment. Each system has distinct technical and operational characteristics and is not suitable for all water types. The selection and implementation of each system are examined in detail in the following chapters of this thesis. Beyond water treatment and management, NBS offer multiple co-benefits, such as enhancing biodiversity, producing food, and improving energy efficiency through thermal insulation. These multiple benefits interact and reinforce one another, forming the Water-Energy-Food-Ecosystem (WEFE) Nexus. This nexus is closely linked to NBS, as each system contributes in a unique way to the different sectors of the nexus. The relationship between the WEFE Nexus and the individual NBS systems is analyzed in detail in the present thesis. Depending on their type, NBS are suited to different needs and types of water, while factors such as area and vegetation influence their performance. Examples include constructed wetlands, green roofs and walls, rainwater harvesting systems, bioretention systems, and rain gardens. Each type of NBS contributes to different sectors of the Water-Energy-Food-Ecosystem (WEFE) nexus, while also offering environmental, aesthetic, and functional benefits. Their integration with other technologies, such as photovoltaics, enhances sustainability and energy efficiency. Overall, NBS are multidimensional solutions that can address modern environmental challenges, particularly in urban areas.

## Περιεχόμενα

1. Εισαγωγή .....	4 -
1.1 Υδατικοί πόροι και περιβαλλοντικά ζητήματα .....	4 -
1.2 Σκοπός Διπλωματικής Εργασίας .....	9 -
1.3 Μεθοδολογία.....	9 -
1.4 Δομή της εργασίας.....	13 -
2. Τύποι Νερού .....	14 -
2.1 Εισαγωγή.....	14 -
2.2 Νομοθεσία για τη χρήση νερού και επαναχρησιμοποίηση λυμάτων στην Ευρωπαϊκή Ένωση .....	16 -
2.2.1 Ευρωπαϊκής Οδηγίας 2020/2184/ΕΕ .....	17 -
2.2.2 Κανονισμός για την επαναχρησιμοποίηση των υδάτων (ΕΕ) 2020/741 .....	18 -
2.3 Βρόχινο Νερό .....	21 -
2.3.1 Φυσικοχημικά χαρακτηριστικά .....	21 -
2.3.2 Επεξεργασία.....	25 -
2.4 Απορροή Όμβριων Υδάτων .....	26 -
2.4.1 Φυσικοχημικά χαρακτηριστικά .....	26 -
2.4.2 Επεξεργασία.....	31 -
2.5 Αστικά Λύματα .....	32 -
2.5.1 Χαρακτηριστικά .....	32 -
2.5.2 Επεξεργασία.....	33 -
2.6 Γκρίζο Νερό .....	35 -
2.6.1 Χαρακτηριστικά διαφορετικών πηγών .....	35 -
2.6.2 Επεξεργασία.....	38 -
2.7 Μαύρα Ύδατα .....	40 -
2.7.1 Χαρακτηριστικά από Διάφορες Πηγές .....	40 -
2.7.2 Επεξεργασία.....	42 -
3. Λύσεις Βασισμένες στη φύση (Nature-Based Solutions).....	44 -
3.1 Εισαγωγή.....	44 -
3.2 Πράσινες στέγες / Green roofs.....	46 -
3.2.1 Χαρακτηριστικά .....	46 -
3.2.2 Επεξεργασία.....	49 -
3.3 Συστήματα συλλογής όμβριων υδάτων / Rainwater Harvesting Systems.....	52 -

3.3.1	Χαρακτηριστικά .....	52 -
3.3.2	Επεξεργασία.....	53 -
3.4	Πράσινοι τοίχοι / Green walls.....	54 -
3.4.1	Χαρακτηριστικά .....	54 -
3.4.2	Επεξεργασία.....	56 -
3.5	Τεχνητοί υγροβιότοποι / Constructed Wetlands .....	57 -
3.5.1	Χαρακτηριστικά .....	57 -
3.5.2	Επεξεργασία.....	59 -
3.6	Συστήματα Βιοκατακράτησης / Bioretention systems (BRS) .....	62 -
3.6.1	Χαρακτηριστικά .....	62 -
3.6.2	Επεξεργασία.....	63 -
3.7	Κήπος Βροχής / Rain garden .....	66 -
3.7.1	Χαρακτηριστικά .....	66 -
3.7.2	Επεξεργασία.....	67 -
4.	Πλέγμα Νερού-Ενέργειας-Τροφίμων-Οικοσυστημάτων (Water-Energy-Food-Ecosystem, WEFE Nexus) .....	69 -
5.	Η συσχέτιση των NBS με το πλέγμα WEFE .....	73 -
5.1	Εισαγωγή.....	73 -
5.2	Πράσινες στέγες και η συσχέτιση τους με το πλέγμα Νερό- Ενέργεια- Τροφή- Οικοσύστημα.....	75 -
5.3	Συστήματα συλλογής όμβριων υδάτων και η συσχέτιση τους με το πλέγμα WEFE .....	77 -
5.4	Πράσινοι τοίχοι και η συσχέτιση τους με το πλέγμα Νερό- Ενέργεια- Τροφή- Οικοσύστημα.....	80 -
5.5	Τεχνητοί υγροβιότοποι και η συσχέτιση τους με το πλέγμα Νερό- Ενέργεια- Τροφή- Οικοσύστημα.....	82 -
5.6	Συστήματα Βιοκατακράτησης και η συσχέτιση τους με το πλέγμα Νερό- Ενέργεια- Τροφή- Οικοσύστημα .....	84 -
5.7	Κήποι βροχής και η συσχέτιση τους με το πλέγμα Νερό- Ενέργεια- Τροφή- Οικοσύστημα -	86 -
6.	Συμπεράσματα .....	88 -
	Βιβλιογραφία .....	90 -

## Κατάλογος Πινάκων

<b>Πίνακας 1</b> Επιλεγμένα Όρια Ποιότητας Πόσιμου Νερού – Οδηγία 2020/2184/ΕΕ.....	- 17 -
<b>Πίνακας 2</b> Απαιτήσεις ποιότητας του ανακτημένου νερού για γεωργική άρδευση (Ευρωπαϊκό-Κοινοβούλιο, 2023). .....	- 19 -
<b>Πίνακας 3</b> Απαιτήσεις για απορρίψεις από σταθμούς επεξεργασίας αστικών λυμάτων που διέπονται από τα άρθρα 4 και 5 της παρούσας οδηγίας. Εφαρμόζεται η τιμή συγκέντρωσης ή το ποσοστό μείωσης (91/271/ΕΟΚ). .....	- 20 -
<b>Πίνακας 4</b> Φυσικοχημικά χαρακτηριστικά του βρόχινου νερού .....	- 22 -
<b>Πίνακας 5</b> Δείκτες κοπράνων και παθογόνα στο βρόχινο νερό σύμφωνα με (Leong, 2017)....	- 24 -
<b>Πίνακας 6</b> Χαρακτηριστικά ποιότητας αστικών υδάτων απορροής σε διαφορετικές λεκάνες απορροής και διαφορετικές περιοχές (Kumar, et al., 2024) (Liu, 2020). .....	- 27 -
<b>Πίνακας 7</b> Η συγκέντρωση δεικτών βακτηρίων και παθογόνων σε λύματα, επιφανειακά νερά, όμβρια ύδατα και απορροές (Sánchez, et al., 2015). .....	- 30 -
<b>Πίνακας 8</b> Χαρακτηριστικά επεξεργασμένων λυμάτων. ....	- 34 -
<b>Πίνακας 9</b> Χαρακτηρισμός πολλών πηγών γκρίζου νερού και φυσικών χαρακτηριστικών, οργανικός άνθρακας, στερεά και θρεπτικά συστατικά (μέσες τιμές ± τυπική απόκλιση) (Noutsopoulos., et al., 2018).....	- 35 -
<b>Πίνακας 10</b> Φυσικοχημικά χαρακτηριστικά του γκρίζου νερού .....	- 36 -
<b>Πίνακας 11</b> Δείκτες κοπρανώδους μόλυνσης και παθογόνα στο γκρίζο νερό. ....	- 37 -
<b>Πίνακας 12</b> Χαρακτηριστικά διάφορων είδη νερού από διαφορετικές προελεύσεις (Wang, 2024).....	- 40 -
<b>Πίνακας 13</b> Χαρακτηριστικά των μαύρων υδάτων που συλλέχθηκαν από τουαλέτες με διπλό καζανάκι. ....	- 41 -
<b>Πίνακας 14</b> Μέση χαρακτηριστική τιμή του μαύρου νερού για δείκτες μόλυνσης. ....	- 42 -
<b>Πίνακας 15</b> Μέσα χαρακτηριστικά εισροής και εκροής για το γκρίζο νερό (Avery, 2007).-	50 -
<b>Πίνακας 17</b> Μέση χαρακτηριστικά εισροής και εκροής για το γκρίζο νερό. ....	- 59 -
<b>Πίνακας 17</b> Ποσοστό αφαίρεσης σε συστήματα βιοκατακράτησης % (Bioretention Systems - BRS). ....	- 64 -
<b>Πίνακας 18</b> Αποτελεσματικότητα απομάκρυνσης ρύπων από επεξεργασμένα εκροές νερού βροχής για διαφορά συστήματα βιοκατακράτησης .....	- 65 -
<b>Πίνακας 19</b> Ποσοστό αφαίρεσης %.....	- 68 -
<b>Πίνακας 20</b> Λύσεις που βασίζονται στη φύση και η συσχέτιση τους με το πλέγμα Νερού-Ενέργειας-Τροφίμων (WEFE) .....	- 74 -
<b>Πίνακας 21</b> Πράσινες στέγες και η επιρροή τους στο πλέγμα WEFE .....	- 76 -
<b>Πίνακας 22</b> Συστήματα συλλογής όμβριων υδάτων και η επιρροή τους στο πλέγμα WEFE-	79 -
-	
<b>Πίνακας 23</b> Πράσινοι τοίχοι και η επιρροή τους στο πλέγμα WEFE.....	- 81 -
<b>Πίνακας 24</b> Τεχνητοί υγροβιότοποι και η επιρροή τους στο πλέγμα WEFE.....	- 83 -
<b>Πίνακας 25</b> Τα συστήματα βιοκράτησης και η επιρροή τους στο πλέγμα WEFE.....	- 85 -
<b>Πίνακας 26</b> Κήποι βροχής και η επιρροή τους στο πλέγμα WEFE .....	- 87 -

## Κατάλογος Εικόνων

<b>Εικόνα 1</b> Πράσινες στέγες σε κτίρια κατοικιών (1,2), θεσμικά κτίρια (3,4), εμπορικά κτίρια (5,6) (Shafique, et al., 2018).....	- 47 -
<b>Εικόνα 2</b> Στρώματα που χρησιμοποιούνται συχνά για κάθε τύπο πράσινης στέγης: εκτεταμένα, ημι-εντατικά και εντατικά. Προσαρμογή εικόνας από (Fiorentin, et al., 2024)...	- 48 -
<b>Εικόνα 3</b> Ταξινόμηση των κατακόρυφων συστημάτων πρασίνων κήπων. Πράσινες προσόψεις, μέθοδοι πρασίνων κήπων που βασίζονται στο έδαφος (άμεση και διπλή πράσινη πρόσοψη) και πράσινοι τοίχοι, μέθοδοι πράσινοι τοίχοι που βασίζονται σε τοίχους (συνεχείς, μοναδικοί και γραμμικοί πράσινοι τοίχοι) Προσαρμογή εικόνας από (Medl, et al., 2017).....	- 55 -
<b>Εικόνα 4</b> Σχηματική διάταξη διαφορετικών τύπων τεχνικών υδροβιοτοπων. (α) ελεύθερη επιφανειακή ροή νερού b) οριζόντια υποεπιφανειακή ροή. (c) κάθετη υποεπιφανειακή ροή. Προσαρμογή εικόνας από (Wang, et al., 2017).....	- 58 -
<b>Εικόνα 6</b> Σχηματική Αναπαράσταση Βιοκράτησης με Διάταξη Εσωτερικής Αποθήκευσης Νερού. Προσαρμογή εικόνας από (Vijayaraghavan, et al., 2021).....	- 63 -
<b>Εικόνα 7</b> Ένα συνηθισμένο το προφίλ κήπου βροχής. Προσαρμογή εικόνας από (Tang, 2024).....	- 67 -
<b>Εικόνα 8</b> Η σχέση νερού-ενέργειας-τροφίμων-οικοσυστημάτων (πλέγμα WEFEE). Προσαρμογή από το διάγραμμα του (Ma, et al., 2024).....	- 71 -

## Κατάλογος Διαγραμμάτων

**Διάγραμμα 1** Μεθοδολογία με τις κυρίες λέξεις κλειδιά που χρησιμοποιήθηκαν για την αναζήτηση της βιβλιογραφίας.

- 9 -

## Ευρετήριο Όρων

BOD <sub>5</sub>	Βιοχημικώς απαιτούμενο οξυγόνο
CODs	Χημικώς απαιτούμενο οξυγόνο (διαλυτό)
CODt	Χημικώς απαιτούμενο οξυγόνο (ολικό)
Cu	Χαλκός
DO	Διαλυμένο οξυγόνο
N	Άζωτο
Na	Νάτριο
NBS	Φυσικές λύσεις / Φυσικά συστήματα (Nature-Based Solutions)
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	Αμμωνιακό άζωτο
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Νιτρικό ιόν
NO <sub>3</sub> -N	Νιτρικό άζωτο
NTU	Θολότητα
P	Φώσφορος
RHS	Συστήματα συλλογής βρόχινου νερού (Rainwater Harvesting Systems)
TKN	Ολικό κατά Kjeldahl άζωτο
TN	Ολικό άζωτο
TOC	Ολικός οργανικός άνθρακας
TP/ Ptotal	Ολικός φώσφορος
TS	Ολικά στερεά
TSS	Ολικά αιωρούμενα στερεά
VS	Πτητικά στερεά
VSS	Πτητικά αιωρούμενα στερεά
WEFE Nexus	Πλέγμα Νερού-Ενέργειας-Τροφίμων-Οικοσυστημάτων (Water-Energy-Food-Ecosystem)
WWTPs	Εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων (wastewater treatment plants)
Zn	Ψευδάργυρος

# 1. Εισαγωγή

## 1.1 Υδατικοί πόροι και περιβαλλοντικά ζητήματα

Το νερό αποτελεί θεμελιώδη φυσικό πόρο, απαραίτητο τόσο για την ανθρώπινη ζωή όσο και για τη διατήρηση των οικοσυστημάτων και την υποστήριξη παραγωγικών δραστηριοτήτων, όπως η γεωργία και η βιομηχανία. Η ορθολογική διαχείριση των υδάτινων πόρων είναι ζωτικής σημασίας για τη βιώσιμη χρήση τους και την κάλυψη της συνεχώς αυξανόμενης ζήτησης.

Στο σύγχρονο αστικό περιβάλλον, φαινόμενα όπως η έντονη αστικοποίηση, η κλιματική αλλαγή και η πληθυσμιακή αύξηση καθιστούν αναγκαία την ανάπτυξη ολοκληρωμένων στρατηγικών διαχείρισης νερού. Οι στρατηγικές αυτές θα πρέπει να διασφαλίζουν όχι μόνο την αποτελεσματική αξιοποίηση των πόρων, αλλά και την προστασία των φυσικών οικοσυστημάτων.

Παράλληλα, νέες και εντεινόμενες προκλήσεις προκύπτουν σε σχέση με την ανθεκτικότητα των πόλεων. Η ανεπαρκής συντήρηση των υποδομών, όπως τα δίκτυα αποχέτευσης, σε συνδυασμό με τη συστηματική χρήση μη διαπερατών επιφανειών, συμβάλλουν στην επιδείνωση φαινομένων όπως οι πλημμύρες και η αστική θερμική νησίδα. Η αντιμετώπιση αυτών των προβλημάτων απαιτεί καινοτόμες λύσεις, σχεδιασμένες με γνώμονα τη βιωσιμότητα και την προσαρμογή στην κλιματική αλλαγή (The World Bank, 2021).

Η ενσωμάτωση παραμέτρων βιωσιμότητας στη διαχείριση των αστικών υδάτων αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για τη διασφάλιση δίκαιης, αποδοτικής και υπεύθυνης χρήσης των υδατικών πόρων. Αντιμέτωπες με προκλήσεις όπως η λειψυδρία και οι επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής, οι σύγχρονες κοινωνίες στρέφονται όλο και περισσότερο προς λύσεις που περιλαμβάνουν την επαναχρησιμοποίηση του νερού. Η επεξεργασία και αξιοποίηση γκρίζων και μαύρων υδάτων μπορεί να μειώσει την εξάρτηση από τους συμβατικούς υδάτινους πόρους, ενισχύοντας έτσι τη βιωσιμότητα και την ανθεκτικότητα των υδατικών συστημάτων (Gutiérrez-Nava, et al., 2025).

Παράλληλα, η αυξανόμενη ζήτηση για νερό, τρόφιμα και ενέργεια οδηγεί πολλές χώρες στην υιοθέτηση λύσεων που αξιοποιούν τη φύση ως εργαλείο για την κάλυψη των πολυδιάστατων αυτών αναγκών. Οι Φυσικές Λύσεις (Nature-Based Solutions – NBS) εμπνέονται από τις λειτουργίες των φυσικών οικοσυστημάτων και προωθούν τη βιώσιμη διαχείρισή τους, με σκοπό την ενίσχυση της ανθρώπινης ευημερίας και της οικολογικής ισορροπίας. Συνιστούν μια ολιστική προσέγγιση, η οποία, εκτός από την αποτελεσματική διαχείριση των υδάτων, μπορεί να συμβάλλει και στην κάλυψη διατροφικών αναγκών, μειώνοντας παράλληλα την περιβαλλοντική υποβάθμιση (Kumar, et al., 2021).

Στην παρούσα διπλωματική εργασία αναλύονται οι πηγές νερού και τα χαρακτηριστικά τους, ενώ εξετάζονται φιλικές προς το περιβάλλον μέθοδοι επεξεργασίας του, με έμφαση στα NBS. Τα NBS προσφέρουν καινοτόμες προσεγγίσεις στη διαχείριση βρόχινων και αστικών λυμάτων, αξιοποιώντας φυσικά οικοσυστήματα και διεργασίες. Ορίζονται ως «δράσεις για

την προστασία, τη βιώσιμη διαχείριση και την αποκατάσταση φυσικών ή τροποποιημένων οικοσυστημάτων, οι οποίες αντιμετωπίζουν τις κοινωνικές προκλήσεις με αποτελεσματικό και προσαρμοστικό τρόπο, προσφέροντας ταυτόχρονα οφέλη για την ανθρώπινη ευημερία και τη βιοποικιλότητα (The World Bank, 2021).

Τα NBS προωθούν την ενίσχυση της αστικής ανθεκτικότητας, συνδυάζοντας οικολογικές και τεχνικές λύσεις. Συμβάλλουν στη μείωση των κινδύνων από φυσικές καταστροφές, ενισχύοντας την προστασία απέναντι στην κλιματική αλλαγή. Παράλληλα, συμβάλλουν στην αποκατάσταση της βιοποικιλότητας, προσφέρουν χώρους αναψυχής και προάγουν τη σωματική και ψυχική υγεία. Περιλαμβάνουν ένα φάσμα δομικών και μη δομικών παρεμβάσεων που μειώνουν τον αντίκτυπο κινδύνων όπως πλημμύρες, διάβρωση του εδάφους, κατολισθήσεις, ξηρασίες και ακραία θερμικά φαινόμενα, ενώ συχνά συμπληρώνουν ή ενισχύουν τις παραδοσιακές υποδομές, προσφέροντας οικονομικά αποδοτικές εναλλακτικές (The World Bank, 2021).

Τα τελευταία χρόνια, τα NBS έχουν κερδίσει έδαφος λόγω της ικανότητάς τους να διαχειρίζονται σύνθετους υδρο-μετεωρολογικούς κινδύνους, όπως πλημμύρες, ξηρασίες, καύσωνες και παράκτιες καταιγίδες. Τα φαινόμενα αυτά, που σχετίζονται με την κλιματική αλλαγή και την επιτάχυνση του υδρολογικού κύκλου, έχουν προκαλέσει σημαντικές ανθρώπινες και οικονομικές απώλειες. Ενδεικτικά, σχεδόν το 90% των σοβαρών φυσικών καταστροφών των δύο τελευταίων δεκαετιών ήταν υδρο-μετεωρολογικής φύσης, με μακροχρόνιες επιπτώσεις στα φυσικά και κοινωνικά συστήματα.

Υπάρχουν ισχυρές ενδείξεις ότι τα NBS μπορούν να ρυθμίσουν διεργασίες που οδηγούν σε αυτούς τους κινδύνους, παρέχοντας ταυτόχρονα συνδυαστικά οφέλη που οι παραδοσιακές τεχνικές υποδομές δεν μπορούν να προσφέρουν. Μεταξύ αυτών συγκαταλέγονται η ρύθμιση των υδάτων, η ενίσχυση της πρόσβασης σε χώρους πρασίνου, η δημιουργία ευκαιριών αναψυχής και η περιβαλλοντική αναζωογόνηση αστικών περιοχών (Kumar, et al., 2021).

Τα NBS θεωρούνται πλέον βασικός πυλώνας για τη δημιουργία ανθεκτικών και βιώσιμων πόλεων. Εφαρμόζονται σε διάφορες κλίμακες, από πράσινες στέγες και κάθετους κήπους, έως πάρκα, αστικά δάση και πράσινους διαδρόμους, παρέχοντας πολλαπλά οφέλη στους κατοίκους. Εφαρμογές όπως η αποκατάσταση υγροτόπων, η αναδάσωση και η ανάπτυξη πράσινων αστικών περιοχών προσφέρουν περιβαλλοντικά βιώσιμες και οικονομικά αποδοτικές λύσεις έναντι των παραδοσιακών τεχνικών, ενώ συμβάλλουν στη βελτίωση της ποιότητας του νερού, στη διατήρηση της βιοποικιλότητας, στη μείωση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης και του θορύβου, και στην παροχή τροφής και ψυχαγωγίας (Istrate, et al., 2023).

Συνολικά, τα NBS αποτελούν ένα ισχυρό εργαλείο για την αντιμετώπιση σύνθετων περιβαλλοντικών και κοινωνικών προκλήσεων, προσφέροντας σημαντικά κοινωνικά, οικονομικά και οικολογικά οφέλη (Langergraber, et al., 2021). Η εφαρμογή τους ενισχύει τη βιώσιμη διαχείριση των φυσικών πόρων, συμβάλλοντας στη δημιουργία ανθεκτικών και ευημερούντων κοινωνιών.

Η ανάγκη για τέτοιες ολιστικές προσεγγίσεις καθίσταται επιτακτική, καθώς οι φυσικοί πόροι όπως το νερό, η ενέργεια και η τροφή, δέχονται ολοένα εντονότερες πιέσεις. Αποτελούν τους θεμέλιους λίθους για τη διατήρηση της ανθρώπινης ζωής, ωστόσο επηρεάζονται άμεσα από

τη ραγδαία πληθυσμιακή αύξηση, την οικονομική ανάπτυξη, την αστικοποίηση και την αποσπασματική διαχείριση. Οι πιέσεις αυτές εντείνονται περαιτέρω λόγω της κλιματικής αλλαγής και των συνεπειών της, περιπλέκοντας το παγκόσμιο τοπίο διαχείρισης των πόρων.

Ενδεικτικά, η παγκόσμια ζήτηση για νερό αναμένεται να αυξηθεί κατά 55% μέχρι το 2050, γεγονός που ενδέχεται να οδηγήσει σε σοβαρή λειψυδρία για περισσότερο από το 40% του παγκόσμιου πληθυσμού. Την ίδια περίοδο, η ανάγκη για παραγωγή τροφίμων προβλέπεται να αυξηθεί κατά 60%. Οι προβλέψεις αυτές καταδεικνύουν τον επείγοντα χαρακτήρα της υιοθέτησης προσεγγίσεων, όπως το πλέγμα Νερού-Ενέργειας-Τροφίμων (Water-Energy-Food Nexus / πλέγμα WEFE), που αναγνωρίζει την αλληλεξάρτηση των πόρων και προωθεί τη συνολική διαχείρισή τους.

Συνήθως, τα προβλήματα του νερού, της ενέργειας και της τροφής αντιμετωπίζονταν μεμονωμένα, γεγονός που οδηγούσε στην επίλυση ενός ζητήματος εις βάρος άλλων. Έτσι, η ανάγκη για μια ολοκληρωμένη προσέγγιση οδήγησε στην ανάπτυξη του πλέγματος WEFE, το οποίο παρουσιάστηκε επίσημα στη Διάσκεψη της Βόννης το 2011.

Το πλέγμα WEFE εκτός από τα τέσσερα βασικά στοιχεία του αφορά και άλλες παραμέτρους, όπως το έδαφος, το κλίμα και η υγεία. Έχει προσελκύσει το ενδιαφέρον της επιστημονικής κοινότητας και των πολιτικών φορέων ως μια καινοτόμος προσέγγιση για την επίλυση σύνθετων ζητημάτων διαχείρισης πόρων (Charagain, et al., 2023).

Εξετάζει την πολυδιάστατη και αλληλένδετη σχέση μεταξύ των φυσικών πόρων (νερό, ενέργεια, τρόφιμα) και των κοινωνικοοικονομικών απαιτήσεων. Οι ενέργειες προς την αξιοποίηση ενός πόρου μπορεί να επηρεάζουν αρνητικά τη διαθεσιμότητα των άλλων, ενώ η χρήση τους πρέπει να αξιολογείται σε κυκλικό και καθολικό πλαίσιο, ιδίως λόγω της πίεσης που ασκείται από την κλιματική αλλαγή και την αστικοποίηση (Carvalho, et al., 2022).

Τα NBS μπορούν να προσφέρουν οφέλη στο πλαίσιο του πλέγματος WEFE, το οποίο τα τελευταία χρόνια κερδίζει έδαφος ως μια ολιστική προσέγγιση για την κατανόηση της σύνδεσης μεταξύ νερού-ενέργειας-τροφής-οικοσυστημάτων, είτε ως συνέργειες είτε ως αντισταθμιστικές σχέσεις. Το πλέγμα WEFE αναδεικνύει το πώς η ασφάλεια των υδάτινων πόρων συνδέεται άμεσα με την ενεργειακή και τη διατροφική ασφάλεια, ενώ η υποβάθμιση των οικοσυστημάτων μπορεί να έχει εκτεταμένες επιπτώσεις και στους τρεις τομείς. Η προσέγγιση αυτή είναι ιδιαίτερα κρίσιμη για περιοχές που αντιμετωπίζουν σύνθετες προκλήσεις ισορροπίας μεταξύ αντικρουόμενων στόχων ασφάλειας. Το πλέγμα WEFE εξετάζει τη μεταξύ τους αλληλεξάρτηση και προωθεί την ολοκληρωμένη διαχείριση των πόρων. Στόχος του είναι η ανάπτυξη πολιτικών και στρατηγικών που διασφαλίζουν τη βιωσιμότητα των υδατικών πόρων, ενώ παράλληλα καλύπτουν τις ανάγκες για ενεργειακή παραγωγή, διατροφική ασφάλεια και διατήρηση της οικολογικής ισορροπίας (Restrepo, et al., 2024). Παρακάτω παρουσιάζονται κάποιες πτυχές της αλληλεπίδρασης μεταξύ των τεσσάρων στοιχείων του πλέγματος WEFE.

Η βιομηχανική δραστηριότητα αποτελεί βασική αιτία ρύπανσης του νερού καθώς παράγει απορροές που περιέχουν ρυπογόνες ουσίες όπως άζωτο, φώσφορο και βαρέα μέταλλα. Η ελλιπής διαχείριση των βιομηχανικών αποβλήτων απειλεί την εύθραυστη ισορροπία των οικοσυστημάτων, διαταράσσοντας τις σχέσεις μεταξύ διαχείρισης υδάτινων πόρων,

ενεργειακής χρήσης και παραγωγής τροφίμων. Τα βιομηχανικά απόβλητα, όπως βαρέα μέταλλα και οργανικές ενώσεις, επιβαρύνουν σοβαρά τα υδάτινα οικοσυστήματα, με αποτέλεσμα την υποβάθμιση της ποιότητας του νερού και την αύξηση περιβαλλοντικών προβλημάτων. Οι θερμικές απορρίψεις και τα θρεπτικά φορτία από βιομηχανικές δραστηριότητες συμβάλλουν στον ευτροφισμό των υδάτων. Ενέργειες για τον περιορισμό αυτών των επιπτώσεων περιλαμβάνουν τη χρήση προηγμένων τεχνολογιών επεξεργασίας, αν και αυτές είναι ενεργοβόρες.

Η παραγωγή ενέργειας συνδέεται άμεσα με τους υδάτινους πόρους και αποτελεί σημαντικό παράγοντα ρύπανσης και εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Η κλιματική αλλαγή επιδεινώνει την κατάσταση, με τον τομέα της ενέργειας να ευθύνεται για το 76% των παγκόσμιων εκπομπών. Η αύξηση της αφαλάτωσης για υδροδότηση αστικών και βιομηχανικών περιοχών επιβεβαιώνει τη στενή σχέση μεταξύ νερού και ενέργειας. Ο τομέας της ενέργειας χρησιμοποιεί μεγάλες ποσότητες νερού για παραγωγή (π.χ. υδροηλεκτρικά, ψύξη θερμικών μονάδων), ενώ συμβάλλει στη ρύπανση μέσω εξορύξεων και απορρίψεων.

Το πλέγμα WEFE χαρακτηρίζεται από σύνθετες σχέσεις και αλληλεπιδράσεις: η γεωργία εξαρτάται από την ενέργεια για μηχανοποίηση, άρδευση, και παραγωγή λιπασμάτων και φυτοφαρμάκων, ενώ η παραγωγή ενέργειας επηρεάζει τη γεωργία μέσω της χρήσης νερού και γης, ιδιαίτερα στην περίπτωση των βιοκαυσίμων. Η εντατικοποίηση της γεωργίας αυξάνει τη ζήτηση ενέργειας, ενώ οι εκπομπές της ενέργειας επηρεάζουν αρνητικά την αγροτική παραγωγικότητα λόγω της κλιματικής αλλαγής (Javan, et al., 2025).

Τέλος, το οικοσυστημικό σκέλος του πλέγματος WEFE υπογραμμίζει τη σημασία της ενσωμάτωσης πράσινων υποδομών που συνδυάζουν την υγειονομική τεχνολογία με την προστασία του περιβάλλοντος. Η υιοθέτηση τέτοιων υποδομών ενισχύει τη βιωσιμότητα των οικοσυστημάτων, συμβάλλοντας παράλληλα στη δημόσια υγεία μέσω της μείωσης των φορέων ασθενειών και της δημιουργίας καθαρότερου περιβάλλοντος.

Οι ανατροφοδοτήσεις (feedback loops) του πλέγματος γίνονται φανερές στην αλληλεπίδραση κλιματικής αλλαγής και υδάτινων πόρων: οι αλλαγές στις βροχοπτώσεις επηρεάζουν τη διαθεσιμότητα νερού, που με τη σειρά του επηρεάζει την παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας και την απόδοση των συστημάτων ψύξης. Οι λύσεις περιλαμβάνουν την εφαρμογή τεχνολογιών εξοικονόμησης νερού, τη στροφή προς ανανεώσιμες πηγές ενέργειας με χαμηλές απαιτήσεις σε νερό και τη βιώσιμη διαχείριση των υδάτινων πόρων όπως τα NBS.

Παράλληλα, η παραγωγή, επεξεργασία και μεταφορά τροφίμων συμβάλλουν στη ρύπανση του περιβάλλοντος. Οι μονάδες επεξεργασίας τροφίμων παράγουν υγρά και στερεά απόβλητα, καθώς και εκπομπές οργανικών πτητικών ενώσεων και αερίων του θερμοκηπίου. Η μεταφορά τροφίμων με οχήματα που χρησιμοποιούν ορυκτά καύσιμα επιδεινώνει τη ρύπανση του αέρα και την κλιματική αλλαγή, όπως και η χρήση ενεργοβόρων γεωργικών μηχανημάτων (Javan, et al., 2025).

Στην παρούσα διπλωματική εργασία αναλύεται ένα ευρύ φάσμα NBS και εξετάζεται η διασύνδεσή τους με τους τέσσερις άξονες του πλέγματος WEFE, στο πλαίσιο μιας ολιστικής προσέγγισης για τη βιώσιμη διαχείριση, επεξεργασία και επαναχρησιμοποίηση των

υδατικών πόρων. Επιπλέον, παρουσιάζονται τα διαφορετικά οφέλη που προσφέρει κάθε σύστημα NBS σε σχέση με το πλέγμα WEFE.

Η υιοθέτηση των NBS υπό το πρίσμα του πλέγματος WEFE προσφέρει ολοκληρωμένες λύσεις για την αντιμετώπιση σύνθετων περιβαλλοντικών και κοινωνικών προκλήσεων, προωθώντας την αειφόρο ανάπτυξη και τη βέλτιστη διαχείριση των φυσικών πόρων. Η ενσωμάτωση τέτοιων στρατηγικών στις σύγχρονες πρακτικές διαχείρισης υδάτων δεν συμβάλλει μόνο στην αντιμετώπιση των άμεσων προκλήσεων, αλλά και στην επίτευξη μακροπρόθεσμης βιωσιμότητας, ανθεκτικότητας και εναρμόνισης με τους παγκόσμιους περιβαλλοντικούς στόχους.

## 1.2 Σκοπός Διπλωματικής Εργασίας

Η εργασία εντάσσει τα NBS στο πλαίσιο του πλέγματος WEFE, αναλύοντας τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ αυτών των τεσσάρων κρίσιμων και αλληλεξαρτώμενων τομέων. Μέσα από αυτή την ολοκληρωμένη προσέγγιση, επιδιώκεται η κατανόηση του τρόπου με τον οποίο τα NBS μπορούν να συμβάλλουν ταυτόχρονα στη βελτιστοποίηση της διαχείρισης του νερού, στην ενεργειακή αποδοτικότητα, στην ενίσχυση της επισιτιστικής ασφάλειας και στη διατήρηση της οικολογικής ισορροπίας.

Μέσω της συστηματικής ανάλυσης διαφόρων τύπων NBS, η εργασία αποσκοπεί στην κατανόηση του ρόλου τους ως ολοκληρωμένων και βιώσιμων λύσεων, ικανών να ενισχύσουν την ανθεκτικότητα φυσικών συστημάτων. Παράλληλα, προσεγγίζει την κρίσιμη πρόκληση της υδατικής ανεπάρκειας και τη διαχείριση και επαναχρησιμοποίηση συμβατικών και μη συμβατικών υδατικών πόρων, εντάσσοντας τα NBS στο πλαίσιο του πλέγματος WEFE Nexus και αναδεικνύοντας τα πολλαπλά οφέλη που προκύπτουν για κάθε επιμέρους τομέα: νερό, ενέργεια, τρόφιμα και οικοσυστήματα.

Η εργασία εστιάζει στην αξιολόγηση ενός ευρέος φάσματος NBS ως φυσικών συστημάτων επεξεργασίας νερού που έχουν, ως στόχο τη βιώσιμη και αποδοτική διαχείριση των υδατικών πόρων, καθώς και την επαναχρησιμοποίηση του νερού για την αντιμετώπιση σύγχρονων περιβαλλοντικών προκλήσεων. Ειδικότερα, εξετάζονται οι βασικές κατηγορίες νερού που μπορούν να υποστούν επεξεργασία και αξιολογείται η καταλληλότητα και η αποδοτικότητα κάθε τύπου NBS, για την επεξεργασία διαφορετικών κατηγοριών νερού ανάλογα με τις εκάστοτε ανάγκες. Η αξιολόγηση γίνεται τόσο ως προς την ποιότητα του αποτελέσματος της επεξεργασίας βάσει των προτύπων νερού, όσο και ως προς τα οφέλη που προσφέρει κάθε είδος NBS.

## 1.3 Μεθοδολογία

Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για τη βιβλιογραφική ανασκόπηση, βασίζεται στην ανάλυση πηγών μέσω της επιστημονικής βάσης δεδομένων Science Direct, με έμφαση σε επιστημονικά άρθρα και στην αγγλική γλώσσα. Η επιλογή της βιβλιογραφίας έγινε με κριτήριο την χρονολογία δημοσίευσης, εστιάζοντας κυρίως σε μελέτες που δημοσιεύθηκαν από το 2005 και μετά, ώστε να διασφαλίζεται η εγκυρότητα και η αντιπροσωπευτικότητα των δεδομένων και των προσεγγίσεων που εξετάζονται. Η συλλογή κανονισμών και οδηγιών για τα πρότυπα του νερού είναι βασισμένη σε αναζητήσεις που πραγματοποιήθηκαν μέσω επίσημων και αξιόπιστων πηγών, όπως κυβερνητικοί ιστότοποι και πλατφόρμες της Ευρωπαϊκής Ένωσης.

Ιδιαίτερη βαρύτητα δόθηκε σε πρόσφατες ανασκοπήσεις και πρωτογενή ερευνητικά άρθρα, τα οποία αντανακλούν τις σύγχρονες τάσεις και τις τελευταίες εξελίξεις στον τομέα των NBS και της διαχείρισης υδατικών πόρων.

Μεθοδολογικά, η διαδικασία της βιβλιογραφικής ανασκόπησης διαρθρώθηκε σε τρία κύρια στάδια:

## 1. Κατηγοριοποίηση Τύπων Νερού

Το πρώτο στάδιο περιλαμβάνει την εννοιολογική αποσαφήνιση, την καταγραφή των βασικών φυσικοχημικών χαρακτηριστικών, καθώς και την επισκόπηση των μεθόδων επεξεργασίας των επιμέρους τύπων νερού. Η αναζήτηση των πηγών πραγματοποιήθηκε με χρήση λέξεων-κλειδιών σχετικών με τα είδη του νερού, όπως rainwater, stormwater, grey and black water. Ακολούθως, επιλέχθηκαν άρθρα ανασκόπησης και ερευνητικές δημοσιεύσεις που περιείχαν περιγραφές των βασικών χαρακτηριστικών κάθε τύπου, φυσικοχημικά και παθογόνα χαρακτηριστικά, καθώς και πληροφορίες σχετικά με τις αντίστοιχες τεχνικές επεξεργασίας.

Αποκλείστηκαν μελέτες οι οποίες δεν επικεντρώνονταν στα κύρια χαρακτηριστικά των τύπων νερού, όπως εκείνες που αφορούσαν μικροπλαστικά ή πειραματικές εργαστηριακές εφαρμογές που δεν αφορούσαν τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά. Οι συγκεντρωμένες πληροφορίες αξιοποιήθηκαν για τη συστηματική καταγραφή και συγκριτική αξιολόγηση των τύπων νερού σε διαφορετικά γεωγραφικά και περιβαλλοντικά πλαίσια.

Οι τύποι νερού που εξετάζονται διακρίνονται σε:

- Βρόχινο νερό (Rainwater)
- Αστικά απορρέοντα ύδατα (Stormwater)
- Υγρά απόβλητα (Wastewater), τα οποία διακρίνονται περαιτέρω σε:
  - Γκρίζα ύδατα (Greywater)
  - Μαύρα ύδατα (Blackwater)

## 2. Ανάλυση NBS για επεξεργασία νερού

Στο δεύτερο στάδιο της μεθοδολογικής διαδικασίας, πραγματοποιήθηκε βιβλιογραφική καταγραφή και ανάλυση των NBS για την επεξεργασία νερού, με βάση την κατηγοριοποίηση που προτείνουν οι (Langergraber, et al., 2021). Στο συγκεκριμένο άρθρο παρουσιάζεται εκτενής ανάλυση των κυριότερων τύπων NBS, ταξινομημένων σύμφωνα με τον ρόλο τους, τον τρόπο διαχείρισης και τη επεξεργασία του νερού. Για παράδειγμα, οι κατηγορίες περιλαμβάνουν τα συστήματα που σχετίζονται με τη διαχείριση του νερού, με την επεξεργασία του, την αποκατάσταση των οικοτόπων, ενώ μια άλλη αφορά την παραγωγή τροφίμων και βιομάζας.

Με βάση την εν λόγω κατηγοριοποίηση, επιλέχθηκαν οι πιο αντιπροσωπευτικοί και ευρέως γνωστοί τύποι NBS από διαφορετικές κατηγορίες, ώστε να αποτελέσουν αντικείμενο περαιτέρω ανάλυσης. Η αναζήτηση της σχετικής βιβλιογραφίας έγινε μέσω λέξεων-κλειδιών που σχετίζονται με τα NBS και την επεξεργασία νερού. Επιλέχθηκαν πηγές που παρείχαν συνοπτική ή αναλυτική περιγραφή των χαρακτηριστικών των διαφόρων τύπων NBS, καθώς και άρθρα ανασκόπησης ή ερευνητικές δημοσιεύσεις που τεκμηριώνουν τις λειτουργικές τους παραμέτρους και τις μεθόδους επεξεργασίας που εφαρμόζονται ανά τύπο.

Σε αρκετές περιπτώσεις, οι λέξεις-κλειδιά χρησιμοποιήθηκαν συνδυαστικά, συσχετίζοντας κάθε τύπο NBS με συγκεκριμένες κατηγορίες νερού (π.χ. βρόχινο, γκρίζο ή μαύρο), προκειμένου να εντοπιστούν πιο εξειδικευμένες και τεκμηριωμένες πληροφορίες. Από την τελική βιβλιογραφική βάση αποκλείστηκαν μελέτες που δεν εστίαζαν στα βασικά χαρακτηριστικά των NBS και επικεντρώνονταν κυρίως σε νέες τεχνολογικές εφαρμογές, θεωρητικά μοντέλα ή προκαταρκτικές προσεγγίσεις.

Οι λύσεις αυτές περιλαμβάνουν:

- Πράσινες στέγες (Green Roofs)
- Συστήματα συλλογής βρόχινου νερού (Rainwater Harvesting Systems)
- Πράσινοι τοίχοι (Green Walls)
- Τεχνητοί υγρότοποι (Constructed Wetlands)
- Συστήματα βιοδιήθησης (Bioretention Systems)
- Κήποι βροχής (Rain Gardens)

### **3. Διερεύνηση της Σύνδεσης NBS με το πλέγμα WEFE**

Στο τρίτο και τελευταίο στάδιο, εξετάστηκε η διασύνδεση των παραπάνω λύσεων με τις αρχές του πλέγματος WEFE. Αρχικά πραγματοποιήθηκε γενική αναζήτηση για το πλέγμα WEFE, προκειμένου να αποσαφηνιστεί το εννοιολογικό του πλαίσιο και η αλληλεξάρτηση των κλάδων μεταξύ τους. Στη συνέχεια, χρησιμοποιήθηκαν λέξεις-κλειδιά όπως Water-Energy-Food-Ecosystems σε συνδυασμό με κάθε τύπο NBS, ώστε να διερευνηθεί η ενδεχόμενη σύνδεση κάθε λύσης με τις επιμέρους συνιστώσες του πλέγματος.

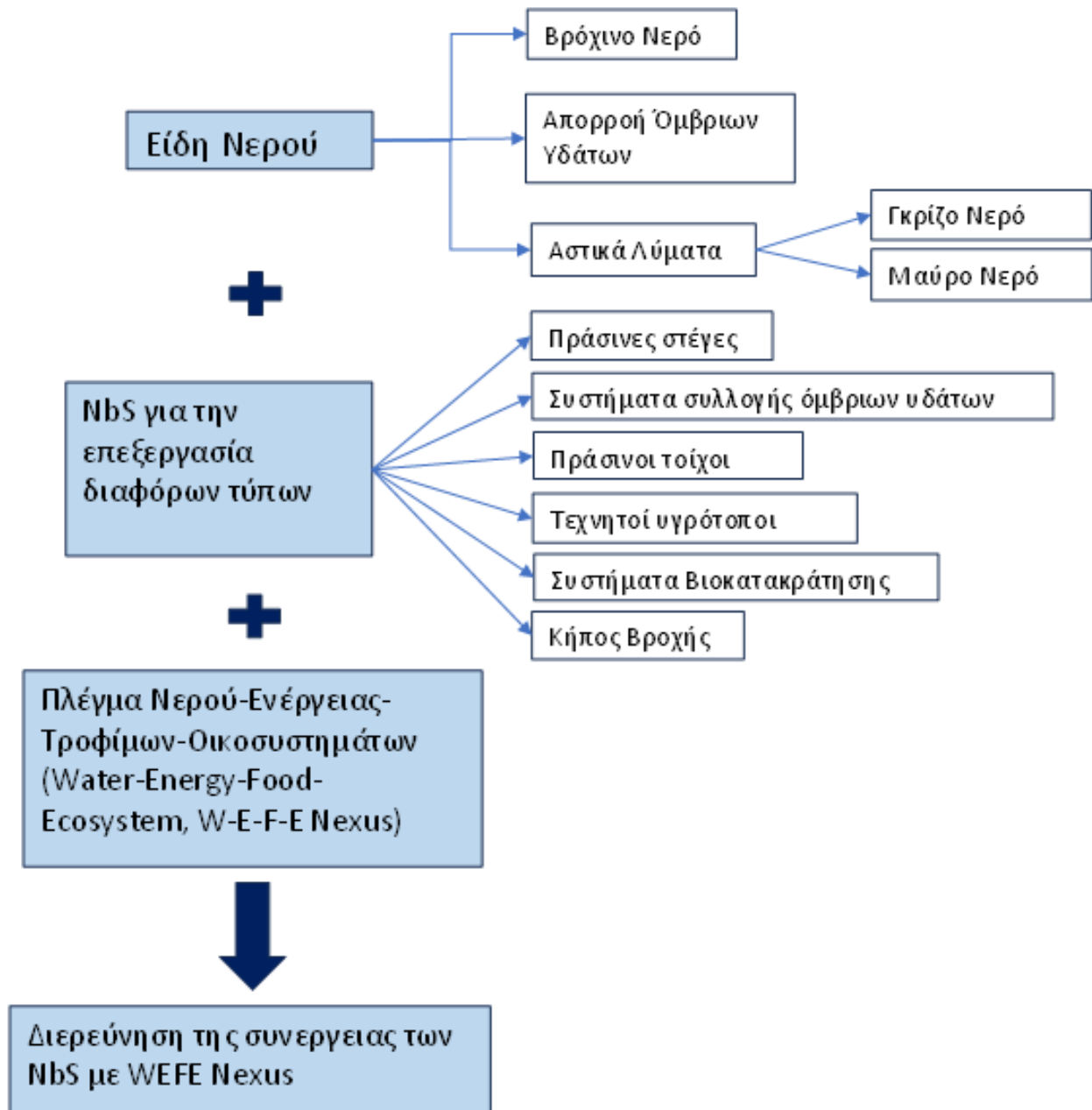
Αποκλείστηκαν μελέτες οι οποίες δεν επικεντρώνονταν στη συσχέτιση των NBS με το πλέγμα WEFE, αλλά εστιάζουν σε άλλες πτυχές, όπως η επίδραση των NBS στη διακυβέρνηση ή σε θεσμικά/πολιτικά πλαίσια, χωρίς άμεση αναφορά στη λειτουργική διασύνδεση με το νερό, την ενέργεια, την τροφή ή τα οικοσυστήματα.

Ειδικότερα, η έμφαση δόθηκε στις επιδράσεις και τις αλληλεξαρτήσεις των τύπων νερού και των NBS στο πλαίσιο της βιώσιμης διαχείρισης των πόρων, με στόχο την κατανόηση της αλληλεπίδρασης μεταξύ αυτών των στοιχείων και της συμβολής τους στην ενίσχυση της αειφορίας.

Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζονται οι βασικές λέξεις-κλειδιά που χρησιμοποιήθηκαν για τη διαμόρφωση της μεθοδολογίας της παρούσας εργασίας, μέσω της επιστημονικής πλατφόρμας ScienceDirect. Όπως απεικονίζεται, η βιβλιογραφική έρευνα ξεκίνησε με την αναζήτηση διαφορετικών τύπων και εναλλακτικών πηγών νερού.

Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε αναζήτηση για NBS με σημείο αναφοράς την κατηγοριοποίηση των (Langergraber, et al., 2021). Από τη σχετική βιβλιογραφία επιλέχθηκαν οι πιο γνωστοί τύποι NBS, με βάση τη συχνότητα εμφάνισής τους στις μελέτες, τη διαθεσιμότητα δεδομένων και τον βαθμό εφαρμογής τους σε πραγματικές συνθήκες.

Για κάθε επιλεγμένο σύστημα NBS, διερευνήθηκε ο τύπος νερού στον οποίο εφαρμόζεται, ο τρόπος επεξεργασίας του νερού και τα αποτελέσματα και οι επιδόσεις του εκάστοτε συστήματος. Τέλος, πάλι με λέξεις κλειδιά εντοπίστηκε η βιβλιογραφία που συνδέει τα NBS με το πλέγμα WEFΕ, καθώς και τα οφέλη που προσφέρει κάθε σύστημα NBS στο πλαίσιο της ολιστικής και βιώσιμης διαχείρισης των φυσικών πόρων.



**Διάγραμμα 1** Μεθοδολογία με τις κυρίες λέξεις κλειδιά που χρησιμοποιήθηκαν για την αναζήτηση της βιβλιογραφίας.

## 1.4 Δομή της εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελείται από τα ακόλουθα κεφάλαια:

1. **Κεφάλαιο 1:** Εισαγωγή στο αντικείμενο.
2. **Κεφάλαιο 2:** Ανάλυση των διαφορετικών τύπων νερού που χρησιμοποιούνται για την διαχείριση και επαναχρησιμοποίηση, με αναφορά στα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά, τους ρύπους που περιέχουν και τις διαθέσιμες μεθόδους επεξεργασίας.
3. **Κεφάλαιο 3:** Παρουσίαση διάφορων τύπων Λύσεων που βασίζονται στη Φύση (NBS) και τρόπων επεξεργασία τους για διαφορετικά είδη νερού.
4. **Κεφάλαιο 4:** Περιγραφή του πλέγματος WEFΕ.
5. **Κεφάλαιο 5:** Σύνδεση του πλέγματος WEFΕ με τα NBS και των πλεονεκτημάτων που προκύπτουν.
6. **Κεφάλαιο 6:** Παρουσίαση των συμπερασμάτων σχετικά με την αποτελεσματικότητα των συστημάτων NBS που αναλύθηκαν και των οφελών που προσφέρει η υλοποίησή τους υπό το πρίσμα του πλέγματος WEFΕ.

## 2. Τύποι Νερού

### 2.1 Εισαγωγή

Το νερό αποτελεί έναν από τους πιο πολύτιμους και αναντικατάστατους φυσικούς πόρους, θεμελιώδους σημασίας για τη διατήρηση της ζωής, την ανθρώπινη υγεία, τη γεωργική παραγωγή, τη βιομηχανική δραστηριότητα, κλπ. Η ορθολογική και βιώσιμη διαχείρισή του καθίσταται πλέον επιτακτική, ιδίως στο πλαίσιο της επιδεινούμενης κλιματικής αλλαγής και της ραγδαίας αύξησης του παγκόσμιου πληθυσμού.

Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται σταθερή μείωση της διαθεσιμότητας υδατικών πόρων, ενώ παράλληλα αυξάνεται η ανάγκη για την αναζήτηση και αξιοποίηση εναλλακτικών, περιβαλλοντικά φιλικών πηγών νερού. Η αύξηση του πληθυσμού εντείνει τις πιέσεις στους φυσικούς πόρους, οδηγώντας σε φαινόμενα φυσικής λειψυδρίας, ιδιαίτερα έντονα στις νότιες και ανατολικές μεσογειακές περιοχές, ενώ ακόμη και οι βόρειες περιοχές ενδέχεται να βιώσουν αυξημένη συχνότητα και ένταση ξηρασιών.

Περαιτέρω, μια σειρά από κλιματικούς και περιβαλλοντικούς κινδύνους, όπως οι παράκτιες πλημμύρες, η διάβρωση εδαφών, η είσοδος θαλάσσιου νερού σε υδροφόρους ορίζοντες, οι δασικές πυρκαγιές και η υποβάθμιση ή απώλεια οικοσυστημάτων, επιτείνουν τις προκλήσεις. Οι επιπτώσεις αυτών των φαινομένων είναι πολυδιάστατες, επηρεάζοντας αρνητικά την επισιτιστική ασφάλεια, τη δημόσια υγεία και την κοινωνική ευημερία (Palatnik, et al., 2025).

Τα κλιματικά φαινόμενα, όπως οι ξηρασίες, οι καύσωνες και οι πλημμύρες, γίνονται όλο και πιο συχνά και πιο έντονα λόγω της κλιματικής αλλαγής και προκαλούν τις τρεις μεγαλύτερες απειλές για τη βιωσιμότητα και ανθεκτικότητα των αστικών περιοχών: έλλειψη νερού, θερμική καταπόνηση και πλημμύρες. Ως εκ τούτου, είναι σημαντικός ο σχεδιασμός πόλεων με μεγαλύτερη ανθεκτικότητα στην κλιματική αλλαγή ώστε να προστατευτούν οι σημερινοί και μελλοντικοί πληθυσμοί. Ένα καλά λειτουργικό αστικό υδροσύστημα μπορεί να μετριάσει αυτές τις απειλές μέσω της αποθήκευσης και παροχής νερού, της ψύξης που σχετίζεται με το νερό και της αποτελεσματικής απορρόφησης και αποστράγγισης της βροχόπτωσης (Swinbourne, et al., 2024).

Αναγνωρίζοντας αυτούς τους κινδύνους και το θεμελιώδες ανθρώπινο δικαίωμα στο καθαρό νερό, ο έκτος Στόχος Βιώσιμης Ανάπτυξης (SDG) των Ηνωμένων Εθνών προωθεί τη βιώσιμη διαχείριση των υδάτων και της αποχέτευσης (Palatnik, et al., 2025). Η επίτευξη του έκτου Στόχου Βιώσιμης Ανάπτυξης (SDG) για καθαρότερο νερό προϋποθέτει τη μείωση της ρύπανσης και την εξάλειψη της απόρριψης επικίνδυνων χημικών ουσιών. Ωστόσο, η υλοποίηση αυτών των μέτρων είναι δύσκολη για χώρες χαμηλού εισοδήματος λόγω του υψηλού ενεργειακού κόστους της επεξεργασίας λυμάτων και της έλλειψης τεχνολογικής προόδου (Javan, et al., 2025).

Η επαναχρησιμοποίηση των λυμάτων αποτελεί μια σύγχρονη πρακτική για την εξοικονόμηση των υδάτινων πόρων, τη μείωση της ρύπανσης από τα μη επαρκώς επεξεργασμένα αστικά

λύματα και τη βιώσιμη ανάπτυξη. Κατά μέσο όρο, πάνω από το 80% των λυμάτων απορρίπτεται χωρίς επεξεργασία, γεγονός που μπορεί να ρυπάνει τους υδάτινους πόρους και να θέσει σε κίνδυνο τη δημόσια υγεία. Τα λύματα αποτελούν ανεκμετάλλευτο πόρο για άρδευση και βιομηχανική χρήση. Επιπλέον, τα υγρά αστικά απόβλητα διακρίνονται σε δύο κατηγορίες: το «μαύρο νερό», δηλαδή τα λύματα από τη λεκάνη της τουαλέτας και, σε ορισμένες περιπτώσεις, από την κουζίνα, και το «γκρίζο νερό», που περιλαμβάνει τα λύματα από τη μπανιέρα, τον νιπτήρα, το πλυντήριο ρούχων, τον νεροχύτη και το πλυντήριο πιάτων. Ωστόσο, μόλις το 11% των εκτιμώμενων οικιακών και βιομηχανικών λυμάτων επαναχρησιμοποιείται σήμερα (Palatnik, et al., 2025). Ανάλογα με την ποιότητά του, το νερό μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί για διάφορες εφαρμογές, συμβάλλοντας στη μείωση της ζήτησης καθαρού πόσιμου νερού. Μία από τις κύριες και καθαρότερες πηγές για συλλογή και επαναχρησιμοποίηση είναι το βρόχινο νερό, το οποίο εμφανίζεται κυρίως με τη μορφή απορροής όμβριων υδάτων (stormwater). Η απορροή αυτή αποτελεί την άμεση απόκριση στη βροχόπτωση και καταλήγει σε χαντάκια, ρέματα ή αγωγούς όμβριων, χωρίς να περιλαμβάνει σημαντική συνιστώσα βάσης ροής (base-flow) (Overton, et al., 2013).

Η κατανόηση αυτών των κατηγοριών συμβάλλει στην αποτελεσματικότερη διαχείριση των υδάτινων πόρων, προωθώντας τη βιώσιμη χρήση και την προστασία του περιβάλλοντος. Η επαναχρησιμοποίηση του νερού μειώνει την περιβαλλοντική επιβάρυνση, περιορίζει την υπεράντληση των υδροφόρων οριζόντων και ενισχύει την ορθολογική διαχείριση των υδάτινων πόρων. Αποτελεί, επομένως, μια στρατηγική λύση για την αντιμετώπιση της λειψυδρίας και τη διατήρηση της οικολογικής ισορροπίας.

Στο επόμενο κεφάλαιο θα παρουσιαστούν και θα αναλυθούν οι βασικές κατηγορίες νερού, που αναφέρθηκαν στις προηγούμενες παραγράφους, με έμφαση στα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά τους, στις διαφοροποιήσεις τους ανάλογα με την περιοχή προέλευσης, καθώς και στους μικροοργανισμούς και τα βακτήρια που ενδέχεται να περιέχουν. Επιπλέον, θα περιγράψει η πιο συνήθης μέθοδος επεξεργασίας για κάθε κατηγορία, προκειμένου το νερό να καθίσταται κατάλληλο είτε για άρδευση είτε για ανθρώπινη κατανάλωση. Τέλος, θα παρουσιαστούν τα ισχύοντα ελληνικά πρότυπα ποιότητας για το πόσιμο νερό, όπως ορίζονται από την εθνική και ευρωπαϊκή νομοθεσία.

## 2.2 Νομοθεσία για τη χρήση νερού και επαναχρησιμοποίηση λυμάτων στην Ευρωπαϊκή Ένωση

Η Ευρωπαϊκή Ένωση (ΕΕ) έχει υιοθετήσει μια ολιστική και ολοκληρωμένη προσέγγιση για τη διαχείριση των υδάτινων πόρων, με στόχο τόσο την προστασία του περιβάλλοντος όσο και τη βιώσιμη κάλυψη των αναγκών των πολιτών και της οικονομίας (European Commission). Μέσω της Οδηγίας-Πλαισίου για τα Ύδατα (Water Framework Directive – 2000/60/EC), θεσμοθετήθηκε ένα ενιαίο θεσμικό πλαίσιο για την επίτευξη της «καλής οικολογικής κατάστασης» όλων των επιφανειακών και υπόγειων υδάτων της ΕΕ (European-Union).

Η νέα Οδηγία για το Πόσιμο Νερό (2020/2184) ενισχύει περαιτέρω την ασφάλεια και την ποιότητα του παρεχόμενου νερού, επιβάλλοντας αυστηρότερα πρότυπα ελέγχου και διαφάνειας, βάσει επιστημονικών δεδομένων και των προτύπων του Παγκόσμιου Οργανισμού Υγείας (WHO) (Ευρωπαϊκό-Κοινοβούλιο, 2020). Ο WHO έχει επίσης δημοσιεύσει εξειδικευμένες κατευθυντήριες γραμμές για την ασφαλή χρήση λυμάτων και γκρίζου νερού σε γεωργικές και αστικές εφαρμογές.

Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή, με την υποστήριξη του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου, ενίσχυσε επιπλέον τη στρατηγική της μέσω του Κανονισμού για την Επαναχρησιμοποίηση του Νερού (EU 2020/741), ο οποίος τέθηκε σε ισχύ τον Ιούνιο του 2023. Ο εν λόγω κανονισμός καθορίζει ελάχιστες ποιοτικές απαιτήσεις για την επαναχρησιμοποίηση επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων για άρδευση στη γεωργία, με στόχο τη μείωση της πίεσης στους υδατικούς πόρους, ιδιαίτερα σε περιόδους λειψυδρίας (Ευρωπαϊκό-Κοινοβούλιο, 2023).

Επιπλέον, τα διεθνή πρότυπα ISO για την επαναχρησιμοποίηση αστικών υδάτων, όπως τα ISO 20760, ISO 20761 και ISO 16075, καθορίζουν τεχνικές και ποιοτικές προδιαγραφές για την ορθή διαχείριση, την υγειονομική ασφάλεια και την παρακολούθηση έργων επαναχρησιμοποίησης. Τα πρότυπα αυτά συνδέονται άμεσα με τις κατευθυντήριες οδηγίες του US Environmental Protection Agency (EPA), καθώς και με τις πρακτικές που προωθούνται από τα προγράμματα του United Nations Environment Programme (UNEP) και του UN Water Decade Programme on Capacity Development (UNW-DPC), τα οποία παρέχουν τεχνογνωσία και υποστήριξη στις χώρες για την ανάπτυξη βιώσιμων και ασφαλών συστημάτων επαναχρησιμοποίησης νερού (Shoushtarian, et al., 2020).

Συνολικά, ο συντονισμένος ρόλος της Ευρωπαϊκής Ένωσης και των διεθνών οργανισμών αναδεικνύει την αναγκαιότητα ύπαρξης εναρμονισμένων προτύπων, αυστηρών ποιοτικών απαιτήσεων και της εφαρμογής λύσεων βασισμένων στη φύση (Nature-Based Solutions) ως αναπόσπαστο στοιχείο της στρατηγικής για την ανθεκτικότητα των υδατικών πόρων, την ενεργειακή αποδοτικότητα και την υγειονομική προστασία των κοινωνιών.

## 2.2.1 Ευρωπαϊκής Οδηγίας 2020/2184/ΕΕ

Η Ευρωπαϊκή Οδηγία 2020/2184/ΕΕ θεσπίστηκε με σκοπό την αναθεώρηση και επικαιροποίηση των προδιαγραφών για την ποιότητα του νερού που προορίζεται για ανθρώπινη κατανάλωση. Η Οδηγία ανταποκρίνεται στις νέες επιστημονικές εξελίξεις και προκλήσεις στον τομέα της δημόσιας υγείας, υιοθετώντας μια προληπτική και ολιστική προσέγγιση για την προστασία της ανθρώπινης υγείας. Συγκεκριμένα, ενσωματώνει αυστηρότερα όρια για ορισμένες χημικές παραμέτρους, όπως ο μόλυβδος και το εξασθενές χρώμιο, ενώ παράλληλα εισάγει για πρώτη φορά παραμέτρους για νέες αναδυόμενες ουσίες, όπως οι υπερφθοριωμένες ενώσεις (PFAS).

Επιπλέον, δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στην καθολική πρόσβαση σε ασφαλές και καθαρό πόσιμο νερό για όλους τους πολίτες της Ευρωπαϊκής Ένωσης, περιλαμβανομένων των ευάλωτων και περιθωριοποιημένων πληθυσμών. Η προσέγγιση της Οδηγίας βασίζεται στην αξιολόγηση κινδύνου σε όλα τα στάδια του υδροδοτικού συστήματος, με στόχο τη διαρκή παρακολούθηση, πρόληψη και διαχείριση πιθανών απειλών για την ποιότητα του νερού.

Τέλος, η Οδηγία ενισχύει τη διαφάνεια και την ενημέρωση των καταναλωτών, καθιστώντας υποχρεωτική την παροχή τακτικών και προσβάσιμων πληροφοριών σχετικά με την ποιότητα του πόσιμου νερού. Με αυτόν τον τρόπο, επιδιώκεται η ενδυνάμωση της εμπιστοσύνης του κοινού στις δημόσιες υπηρεσίες ύδρευσης και η προώθηση της βιώσιμης χρήσης των υδατικών πόρων (Ευρωπαϊκό-Κοινοβούλιο, 2020).

Στον παρακάτω πίνακα 1 φαίνονται τα όρια της οδηγίας για τις κυριότερες παραμέτρους.

**Πίνακας 1** Επιλεγμένα Όρια Ποιότητας Πόσιμου Νερού – Οδηγία 2020/2184/ΕΕ

Παράμετρος	Μέγιστη Επιτρεπτή Τιμή	Μονάδα Μέτρησης	Σημείωση
<b>E. coli</b>	0	cfu/100 mL	Δεν επιτρέπεται παρουσία
<b>Εντερόκοκκοι</b>	0	cfu/100 mL	Δεν επιτρέπεται παρουσία
<b>Μόλυβδος (Pb)</b>	5	μg/L	Νέο αυστηρότερο όριο (από 2036, τώρα 10 μg/L)
<b>Αρσενικό (As)</b>	10	μg/L	Διατηρείται ως έχει
<b>Χρώμιο (Cr)</b>	25	μg/L	Νέα παράμετρος
<b>Νιτρικά (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>)</b>	50	mg/L	Όριο παραμένει ίδιο
<b>Νιτρώδη (NO<sub>2</sub><sup>-</sup>)</b>	0.5	mg/L	Δείκτης ρύπανσης
<b>Αμμώνιο (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>)</b>	0.5	mg/L	Έμμεσος δείκτης μόλυνσης
<b>Φθόριο (F<sup>-</sup>)</b>	1.5	mg/L	Επιτρεπτό όριο σε πολλές χώρες
<b>Χλωριούχα (Cl<sup>-</sup>)</b>	250	mg/L	Αισθητική και λειτουργική παράμετρος
<b>pH</b>	6.5 – 9.5	–	Βέλτιστο εύρος

<b>Ολικό οργανικό άνθρακα (TOC)</b>	Καθορίζεται τοπικά	mg/L	Καθορισμός μέσω εκτίμησης κινδύνου
<b>Βενζόλιο</b>	1	µg/L	Καρκινογόνο — αυστηρός έλεγχος
<b>Περιχλωρικά</b>	4	µg/L	Νέα παράμετρος — σχετίζεται με εκρηκτικά/λιπάσματα
<b>Μικροπλαστικά</b>	-	-	Υποχρέωση παρακολούθησης — χωρίς ακόμα όριο
<b>PFAS (συνολικά)</b>	0.5	µg/L	Νέο αυστηρό όριο για τις υπερφθοριωμένες ενώσεις

PFAS: νοείται το σύνολο των υπερ- και πολυφθοροακυλιωμένων ουσιών.

Με βάση τα ανώτατα επιτρεπτά όρια που καθορίζονται από την Ευρωπαϊκή Οδηγία 2020/2184/ΕΕ, στα επόμενα κεφάλαια θα πραγματοποιηθεί συγκριτική ανάλυση των τιμών των φυσικοχημικών και μικροβιολογικών παραμέτρων για κάθε κατηγορία νερού πριν από την εφαρμογή οποιασδήποτε μεθόδου επεξεργασίας.

### 2.2.2 Κανονισμός για την επαναχρησιμοποίηση των υδάτων (ΕΕ) 2020/741

Ο Κανονισμός (ΕΕ) 2020/741 του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου, της 25ης Μαΐου 2020, θεσπίζει ελάχιστες απαιτήσεις για την ποιότητα του ανακτημένου νερού, καθώς και για τη συχνότητα και μεθοδολογία παρακολούθησης, προκειμένου να διασφαλιστεί η ασφαλής επαναχρησιμοποίησή του για γεωργική άρδευση. Ο Κανονισμός αποτελεί κρίσιμο νομοθετικό εργαλείο στο πλαίσιο της ολοκληρωμένης διαχείρισης των υδάτινων πόρων και εντάσσεται στις στρατηγικές της Ευρωπαϊκής Ένωσης για την κυκλική οικονομία και την ανθεκτικότητα απέναντι στην κλιματική αλλαγή.

Ο Κανονισμός έχει γενική ισχύ, είναι δεσμευτικός στο σύνολό του και εφαρμόζεται άμεσα σε όλα τα κράτη μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης, χωρίς να απαιτείται ενσωμάτωσή του στην εθνική νομοθεσία. Η εφαρμογή του αφορά περιπτώσεις κατά τις οποίες επεξεργασμένα αστικά λύματα επαναχρησιμοποιούνται για γεωργική άρδευση, όπως ορίζεται στο Παράρτημα Ι, Τμήμα 1.

Η εφαρμογή του Κανονισμού συμβάλλει καθοριστικά στην αύξηση της διαθεσιμότητας υδατικών πόρων, στη μείωση της πίεσης σε φυσικά υδάτινα σώματα, και στη διασφάλιση της δημόσιας υγείας μέσω της υιοθέτησης ενιαίων και αυστηρών κριτηρίων επαναχρησιμοποίησης.

Ο πίνακας 2 καθορίζει τις ελάχιστες απαιτήσεις ποιότητας του ανακτημένου νερού που προορίζεται για γεωργική άρδευση, ανάλογα με την κατηγορία χρήσης. Η Κατηγορία Α είναι η αυστηρότερη και αφορά όλες τις καλλιέργειες εδώδιμων φυτών που

καταναλώνονται ωμά και το βρώσιμο μέρος έρχεται σε άμεση επαφή με ανακτημένο νερό, η Κατηγορία Β αφορά εδώδιμα φυτά που καταναλώνονται ωμά χωρίς άμεση επαφή με το νερό, μεταποιούμενα εδώδιμα φυτά, μη εδώδιμα φυτά, καλλιέργειες για ζωοτροφή. Η Κατηγορία Γ αφορά Όμοιες με Β, με επιπλέον περιορισμούς ενώ η Κατηγορία Δ είναι η πιο χαλαρή και αφορά καλλιέργειες χωρίς κίνδυνο για την υγεία (π.χ. ενεργειακές ή βιομηχανικές) (Ευρωπαϊκό-Κοινοβούλιο, 2023).

**Πίνακας 2** Απαιτήσεις ποιότητας του ανακτημένου νερού για γεωργική άρδευση (Ευρωπαϊκό-Κοινοβούλιο, 2023).

Κατηγορία ποιότητας ανακτημένου νερού	Ενδεικτικός τεχνολογικός στόχος	Απαιτήσεις ποιότητας				
		E. coli (αριθμός /100 ml)	BOD5 (mg/l)	TSS (mg/l)	Θολότητα (NTU)	Άλλα
A	Δευτεροβάθμια επεξεργασία, διήθηση και απολύμανση	≤ 10	≤ 10	≤ 10	≤ 5	Legionella spp.: < 1.000 cfu/l, όταν υπάρχει κίνδυνος αερόλυσης
B	Δευτεροβάθμια επεξεργασία και απολύμανση	≤ 100	Σύμφωνα με την οδηγία 91/271/ΕΟΚ	Σύμφωνα με την οδηγία 91/271/ΕΟΚ	-	Εντερικά νηματώδη (αβγά ελμίνθων): ≤ 1 αβγό/l για άρδευση βοσκοτόπων ή χορτονομής
Γ	Δευτεροβάθμια επεξεργασία και απολύμανση	≤ 1 000	(Παράρτημα Ι Πίνακας 1)	(Παράρτημα Ι Πίνακας 1)	-	
Δ	Δευτεροβάθμια επεξεργασία και απολύμανση	≤ 10 000			-	

Από τον παραπάνω πίνακα διαπιστώνεται ότι η Κατηγορία Α εφαρμόζει τα αυστηρότερα πρότυπα, με τις απαιτήσεις να γίνονται σταδιακά πιο ανεκτικές στις κατηγορίες που ακολουθούν. Σύμφωνα με την Οδηγία 91/271/ΕΟΚ, η οποία συμπληρώνει τον πίνακα 2 και αφορά την επεξεργασία αστικών λυμάτων, καθορίζονται οι ελάχιστες απαιτήσεις για τις απορρίψεις επεξεργασμένων λυμάτων από Σταθμούς Επεξεργασίας Λυμάτων (ΣΕΛ). Τα πρότυπα που ισχύουν παρατίθενται παρακάτω (91/271/ΕΟΚ).

**Πίνακας 3** Απαιτήσεις για απορρίψεις από σταθμούς επεξεργασίας αστικών λυμάτων που διέπονται από τα άρθρα 4 και 5 της παρούσας οδηγίας. Εφαρμόζεται η τιμή συγκέντρωσης ή το ποσοστό μείωσης (91/271/ΕΟΚ).

Παράμετρος	Μέγιστη Επιτρεπόμενη Συγκέντρωση	Ελάχιστο Ποσοστό Μείωσης	Μέθοδος Μέτρησης Αναφοράς
BOD <sub>5</sub> (Βιοχημικές Ανάγκες σε Οξυγόνο)	25 mg O <sub>2</sub> /l ή 40 mg O <sub>2</sub> /l για ΣΕΛ με άρθρο 4 παρ. 2	70–90%	Ομογενοποιημένο, αδιήθητο, ακατακάθιστο δείγμα. Επώαση 5 ημερών στους 20 °C ±1°C, παρεμποδιστής νιτροποίησης.
COD (Χημικές Ανάγκες σε Οξυγόνο)	125 mg O <sub>2</sub> /l	75%	Ομογενοποιημένο, αδιήθητο, ακατακάθιστο δείγμα. Ανάλυση με διχρωμικό κάλιο.
Ολικά Αιωρούμενα Στερεά (TSS)	35 mg/l (για >10.000 ισοδ. κατοίκους) ή άλλες τιμές βάσει Ι.Κ.	90% ή 70% ανάλογα με το μέγεθος της εγκατάστασης	Διήθηση από μεμβράνη 0,45 μm ή φυγοκέντρηση → ξήρανση στους 105°C και ζύγιση.

Ο Κανονισμός (ΕΕ) 2020/741 εισάγει ποιοτικές κατηγορίες (Α–Δ) ανακτημένου νερού, οι οποίες συνοδεύονται από αυστηρά όρια μικροβιολογικών και φυσικοχημικών παραμέτρων, ανάλογα με το είδος και την ευαισθησία της προβλεπόμενης χρήσης (π.χ. εδώδιμες καλλιέργειες που καταναλώνονται ωμές). Παράλληλα, η Οδηγία 91/271/ΕΟΚ για την επεξεργασία αστικών λυμάτων συμπληρώνει το νομοθετικό πλαίσιο, καθορίζοντας τις ελάχιστες απαιτήσεις ποιότητας για τις απορρίψεις από μονάδες επεξεργασίας, οι οποίες αποτελούν συχνά την κύρια πηγή ανακτημένου νερού.

Η πλήρης και αποτελεσματική εφαρμογή των παραπάνω κανονισμών απαιτεί τόσο την τεχνική αναβάθμιση των σχετικών υποδομών όσο και τη συνεχή παρακολούθηση της ποιότητας του παραγόμενου νερού. Η ορθολογική και ασφαλής επαναχρησιμοποίησή του μπορεί να συμβάλλει ουσιαστικά στην κάλυψη αρδευτικών αναγκών, στη μείωση της πίεσης στους διαθέσιμους υδατικούς πόρους, καθώς και στην επίτευξη των στόχων της κυκλικής οικονομίας και της βιώσιμης ανάπτυξης.

## 2.3 Βρόχινο Νερό

### 2.3.1 Φυσικοχημικά χαρακτηριστικά

Το βρόχινο νερό είναι ένας φυσικός πόρος και πρωταρχική πηγή νερού, καθοριστικός για την αναπλήρωση των αποθεμάτων γλυκού νερού, τη διατήρηση των οικοσυστημάτων και τη στήριξη της γεωργίας.

Κατά τη διάρκεια της ιστορίας, οι αρχαίοι πολιτισμοί βασίζονταν σε μεγάλο βαθμό στη συλλογή βρόχινου νερού. Κοινωνίες όπως αυτές της Μεσοποταμίας, της Ελλάδας και της Κολιάδας του Ινδού ανέπτυξαν εξελιγμένες τεχνικές συλλογής και αποθήκευσης, δημιουργώντας δεξαμενές, ταμιευτήρες και πολύπλοκα συστήματα άρδευσης για την κάλυψη των καθημερινών τους αναγκών σε νερό.

Αυτά τα αρχαία συστήματα υπογραμμίζουν την αξία του νερού και την ανάγκη ορθολογικής διαχείρισης των φυσικών πόρων, μια αρχή που παραμένει εξαιρετικά επίκαιρη μέχρι και σήμερα (A.N. Angelakis, 2005).

Με την αύξηση της αστικοποίησης και τις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής, η διαχείριση του βρόχινου νερού έχει εξελιχθεί, ενσωματώνοντας σύγχρονες τεχνικές μηχανικής και πράσινης υποδομής (green infrastructure) για τη μεγιστοποίηση της συλλογής νερού, τη μείωση των πλημμυρών και την αναπλήρωση των υπόγειων υδάτων.

Σήμερα, η ορθολογική διαχείριση του βρόχινου νερού είναι ζωτικής σημασίας, καθώς οι πόλεις αντιμετωπίζουν αυξανόμενες προκλήσεις λόγω της περιορισμένης διαθεσιμότητας υδάτινων πόρων. Ένας από τους πιο συνήθεις τρόπους διαχείρισης και αποθήκευσης του είναι τα συστήματα συλλογής βρόχινου νερού (Rainwater Harvesting Systems - RHS), τα οποία συλλέγουν το νερό από λεκάνες απορροής και το αποθηκεύουν σε δεξαμενές για διάφορες χρήσεις (Li, et al., 2024). Η σύγχρονη διαχείριση του βρόχινου νερού ενσωματώνει εξελιγμένα συστήματα για τη συλλογή, την αποθήκευση και την επαναχρησιμοποίησή του, μειώνοντας την εξάρτηση από συμβατικές πηγές νερού. Με την ενσωμάτωση της διαχείρισης του βρόχινου νερού στις αστικές υποδομές, οι κοινότητες μπορούν να ενισχύσουν την τροφοδοσία καθαρού νερού, να υποστηρίξουν τη βιώσιμη γεωργία και να προστατεύσουν τα τοπικά οικοσυστήματα.

Ο πίνακας 4 συνοψίζει τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά του βρόχινου νερού σε διάφορες περιοχές του πλανήτη, όπως η Μαλαισία, η Νότια Αφρική, το Σβάλμπαρντ και η Νοτιοδυτική Κίνα, με τις αντίστοιχες μονάδες μέτρησης, καθώς και τις ελάχιστες και μέγιστες τιμές για κάθε παράμετρο. Αξίζει να σημειωθεί ότι το pH κυμαίνεται από όξινο έως αλκαλικό, ενώ οι παράμετροι με τη μεγαλύτερη συγκέντρωση είναι η αμμωνία ( $\text{NH}_4^+$ ), το μαγνήσιο (Mg), το χλώριο ( $\text{Cl}^-$ ) και το νάτριο ( $\text{Na}^+$ ).

**Πίνακας 4** Φυσικοχημικά χαρακτηριστικά του βρόχινου νερού

Παράμετροι	Μονάδες	Μαλαισία		Νότια Αφρική		Σβάλμπαρντ		Νοτιοδυτική Κίνα	
		Ελαχ.	Μέγιστο	Ελαχ.	Μέγιστο	Ελαχ.	Μέγιστο	Ελαχ.	Μέγιστο
ρΗ		3,1	11,4	4,5	6,5	5,51	7,08	4,2	8
Σκληρότητα	mg/L	0	270						
Θολότητα	NTU	0,2	303,5						
Χρώμα	Pt-Co	0,4	310,5						
Ολικά διαλυμένα στερεά (TDS)	mg/L	1	750						
Ολικά αιωρούμενα στερεά (TSS)	mg/L	1	153						
Ολικά στερεά (TS)	mg/L	20	200						
Βιολογική Απαίτηση Οξυγόνου (BOD <sub>5</sub> )	mg/L	0	3						
Απαίτηση χημικού οξυγόνου (COD)	mg/L	8,74	23,83	4	9,5				
Ολικό άζωτο (N)	mg/L	0,45	1,92						
Ολικός φώσφορος (P)	mg/L	0,21	50						
Νιτρικό άζωτο (NO <sub>3</sub> -N)	mg/L	0	72,4	1	2,3				
Νιτρικά NO <sub>3</sub> -Θειικό SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	mg/L						0,02	0	444
Νιτρώδες-άζωτο (NO <sub>2</sub> -N)	mg/L	0	2,45			0,02	0,09	5,2	2018,8
Διαλυμένο οξυγόνο (DO)	mg/L	4,41	6,79						
Αλουμίνιο (Al)	μg/L	80,2	336	37,8	180,2	2,33	5,38		
Αμμώνιο (NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> )	μg/L	0	35400					0	350,7
Αρσενικό (As)	μg/L	0	27,1	0,3	0,8	0,15	0,28		
Βόριο (B)	μg/L	11	56						
Βάριο (Ba)	μg/L	0	11,2				14,1		
Κάδμιο (Cd)	μg/L	0	0,4	0,06	0,6				
Ασβέστιο (Ca)	μg/L	0	31150	10,5	14,2	8,01	67,4		
Χρώμιο (Cr)	μg/L	0	4,8			0,02	0,4		
Χλώριο (Cl <sup>-</sup> )	μg/L	0	164000	16,7	29,9				
Χαλκός (Cu)	μg/L	1,1	4500						
Φθόριο (F)	μg/L	0	1000						
Σίδηρος (Fe)	μg/L	0	1390			1,39	10		
Μόλυβδος (Pb)	μg/L	2	271			0,21	3,74		
Μαγνήσιο (Mg)	μg/L	0	9350	1,3	2,1	69	1540		
Μαγγάνιο (Mn)	μg/L	0,5	533	0,1	1,8	0,76	3,32		

Υδράργυρος (Hg)	µg/L	0	0			0,04	
Νικέλιο (Ni)	µg/L	0	12,2			0,84	66,4
Κάλιο (K)	µg/L	0	8730	1,7	6,3	156	2180
Φωσφορικά άλατα (PO <sub>4</sub> -P)	µg/L	0	620				
Νάτριο (Na)	µg/L	0	32320	11,8	22,3	610	13100
Ψευδάργυρος (Zn)	µg/L	0,5	3200	0,6	15,8	1,41	184
Πηγή			(Leong, 2017)	(Sánchez, et al., 2015)		(Lehmann- Koner, 2023)	(Han, 2019)

Παρατηρούνται ακραίες μέγιστες τιμές στα ολικά στερεά (TS), στην αμμωνία (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) και στο νάτριο (Na) σε δείγματα νερού από τη Μαλαισία. Ο Πίνακας καταγράφει σημαντικές διαφοροποιήσεις στις παραμέτρους ποιότητας του νερού μεταξύ των εξεταζόμενων περιοχών. Σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή Οδηγία 2020/2184/ΕΕ, η επιτρεπόμενη συγκέντρωση αρσενικού (As) στο πόσιμο νερό δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 10 µg/L, όριο το οποίο παρατηρείται ότι υπερβαίνεται τόσο στη Μαλαισία όσο και στο Σβάλμπαρντ.

Επιπλέον, η τιμή του pH δεν θα πρέπει να υπερβαίνει το 9,5, όριο το οποίο επίσης καταγράφεται σε δείγματα από τη Μαλαισία. Όσον αφορά την αμμωνία (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>), η μέγιστη επιτρεπτή τιμή στο πόσιμο νερό είναι 0,5 mg/L, τιμή που υπερβαίνεται συχνά σε δείγματα από χώρες όπως η Κίνα και η Μαλαισία. Τα δεδομένα αυτά υποδεικνύουν την ανάγκη για περαιτέρω επεξεργασία και παρακολούθηση της ποιότητας του νερού στις εν λόγω περιοχές, ώστε να διασφαλιστεί η δημόσια υγεία και η συμμόρφωση με τα διεθνή πρότυπα.

Το βρόχινο νερό συχνά υπερβαίνει τα πρότυπα πόσιμου νερού σε πολλές χώρες λόγω της υψηλής συγκέντρωσης ρύπων, οι οποίοι προέρχονται από την ατμοσφαιρική ρύπανση, τις δεξαμενές αποθήκευσης και άλλους χώρους συλλογής. Πολλοί μικροοργανισμοί και βακτήρια που αιωρούνται στην ατμόσφαιρα καταλήγουν στο βρόχινο νερό μέσω της εναπόθεσης, ενώ η κύρια πηγή μόλυνσης προέρχεται από τα δοχεία και τις εγκαταστάσεις συλλογής και αποθήκευσής του (Rajni Kaushik, 2012). Ιδιαίτερα κατά τα αρχικά στάδια της βροχόπτωσης, η απορροή παρασύρει ρύπους από τις επιφάνειες συλλογής, όπως σκόνη, περιττώματα πτηνών, έντομα, μύκητες και φυτικά υπολείμματα, ακόμη και όταν πρόκειται για καθαρές μεταλλικές στέγες. Αυτοί οι αερομεταφερόμενοι μικροοργανισμοί και βακτήρια μπορούν να μεταφερθούν στο συλλεγόμενο βρόχινο νερό μέσω ατμοσφαιρικών καταρροών σωματιδίων (ξηρή εναπόθεση), αλλά και με την έκπλυση των επιφανειών της λεκάνης απορροής κατά τη διάρκεια της βροχόπτωσης (υγρή εναπόθεση). Πολλοί μικροοργανισμοί εντοπίζονται συνήθως στις επιφάνειες συλλογής, είτε ενσωματωμένοι σε στρώματα σωματιδιακής εναπόθεσης είτε συνδεδεμένοι με οργανική ύλη (Sánchez, et al., 2015).

Αν και προς το παρόν δεν έχουν διεξαχθεί μελέτες για τον προσδιορισμό των επιπέδων μόλυνσης από βακτηριακά παθογόνα σε φρέσκο βρόχινο νερό πριν από τη συλλογή και αποθήκευσή του, είναι απαραίτητο να εκτιμηθεί η καθαρότητα του νερού και ο αντίκτυπος που έχει η διαδικασία συλλογής του (Rajni Kaushik, 2012). Πηγές ρύπανσης περιλαμβάνουν υλικά κατασκευής, όπως φύλλα επικάλυψης, βαφές, σωληνώσεις και ατμοσφαιρική απόθεση. Η συχνότητα E. Coli στο βρόχινο νερό υποδηλώνει ότι συχνά επιμολύνεται από περιττώματα πτηνών και μικρών θηλαστικών (Leong, 2017). Σύμφωνα με τον πίνακα 5, οι

συγκεντρώσεις αυτές ποικίλλουν ανάλογα με την περιοχή, τις κλιματικές συνθήκες και τον τρόπο συλλογής του βρόχινου νερού.

**Πίνακας 5** Δείκτες κοπράνων και παθογόνα στο βρόχινο νερό σύμφωνα με (Leong, 2017)

Περιοχή	Μαλαισία	Παρθένοι Νήσοι Η.Π.Α.	Νιγηρία	Δανία	Νέα Ζηλανδία	Ηνωμένο Βασίλειο	Ελλάδα	Αυστραλία
<b>Δείκτες κοπράνων</b>								
E. coli	-	-	-	0.6-3.0	-	-	<0.0-2.4	0.5-3.7
Fecal coliforms	<0.0-1.1	<0.0-2.9	<0.0	-	<0.0-2.9	<0.0-3.2	-	-
Total coliforms	1.4-1.9	<0.0-3.5	0.5-1.6	-	0.0-4.3	<0.0-3.4	<0.0-2.8	-
Enterococci	-	-	-	-	0.0-3.7	<0.0-3.2	<0.0-1.5	0.3-3.6
Streptococci	-	-	<0.0	-	-	-	-	-
<b>Βακτηρία παθογόνα</b>								
Aeromonas	-	-	-	1.0-1.5	-	-	-	-
Legionella	-	-	-	0	-	-	-	3.2-4.0
Pseudomonas	-	-	<0.0-2.9	0-1.3	-	-	0	1.4-4.3
Salmonella	-	-	<0.0-2.9	-	-	0	-	-
Shigella	-	-	<0.0-2.3	-	-	-	-	-
Staphylococcus	-	-	-	-	-	-	-	2.8-4.6
Vibrio	-	-	1.0-3.0	-	-	-	-	-
<b>Πρωτόζωα παθογόνα</b>								
Cryptosporidium (oocysts/L)	-	0-0.7	-	0-50	-	0	-	-
Giardia (cysts/L)	-	0-0.04	-	0	-	-	-	-

Συγκέντρωση σε log<sub>10</sub> CFU/100 mL, εκτός εάν δηλώνεται διαφορετικά.

– = μη διαθέσιμα αποτελέσματα

Οι υψηλότερες συγκεντρώσεις καταγράφονται στις παραμέτρους των ολικών κολοβακτηρίων (total coliforms) στη Νέα Ζηλανδία και στις συγκεντρώσεις βακτηρίων και παθογόνων στην Αυστραλία. Ο Πίνακας 5 αναδεικνύει την ποικιλομορφία στις συγκεντρώσεις μικροβιακών ρύπων ανά περιοχή, με τη Νέα Ζηλανδία και την Αυστραλία να παρουσιάζουν υψηλότερες συγκεντρώσεις σε ορισμένους δείκτες. Αντίθετα, χώρες όπως η Μαλαισία και η Ελλάδα έχουν γενικά χαμηλές συγκεντρώσεις μικροβιακών δεικτών, γεγονός που υποδηλώνει καλύτερη ποιότητα βρόχινου νερού. Η παρουσία πρωτόζωων όπως το *Cryptosporidium* στη Δανία απαιτεί προσοχή λόγω των πιθανών κινδύνων για την υγεία (Madgundi, 2023). Γενικότερα

παρατηρείται σε όλες τις περιοχές υψηλή συγκέντρωση σε δείκτες κοπράνων και κυρίως total coliforms.

### 2.3.2 Επεξεργασία

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, το νερό της βροχής μπορεί να περιέχει διάφορους ρύπους που προέρχονται από την ατμόσφαιρα, τις επιφάνειες συλλογής και τη διαδικασία αποθήκευσης. Οι βασικοί ρύποι που πρέπει να αφαιρεθούν είναι τα αιωρούμενα σωματίδια όπως η σκόνη, το χώμα και μικροοργανισμοί που μεταφέρονται από τον αέρα, τα βαρέα μέταλλα, οι οργανικές ενώσεις, οι μικροοργανισμοί (βακτήρια, ιοί, πρωτόζωα, κτλ.) που μπορούν να προκαλέσουν ασθένειες. Η αποτελεσματική απομάκρυνση αυτών των ρύπων εξασφαλίζει ποιότητα νερού κατάλληλου για ανθρώπινη κατανάλωση και χρήση.

Οι διεργασίες που χρησιμοποιούνται συχνά για τον καθαρισμό του βρόχινου νερού περιλαμβάνουν:

- Καθίζηση και επίπλευση, για την απομάκρυνση αιωρούμενων σωματιδίων και ρύπων,
- Φίλτραση, με χρήση υλικών όπως άμμος, φυσίγγια και ενεργός άνθρακας,
- Μεμβρανική διήθηση (μικροδιήθηση, υπερδιήθηση, αντίστροφη ώσμωση),
- Πήξη, κροκίδωση και ιοντοανταλλαγή, για την απομάκρυνση χημικών και βαρέων μετάλλων,
- Απολύμανση, με χλωρίωση, UV ακτινοβολία ή όζον, για την εξάλειψη παθογόνων μικροοργανισμών.

Η επιλογή του κατάλληλου συνδυασμού μεθόδων εξαρτάται από την τελική χρήση του νερού και τη χημική-μικροβιολογική του σύσταση. Ιδιαίτερα όταν το νερό πρόκειται να έρθει σε επαφή με τον ανθρώπινο οργανισμό, απαιτείται αυστηρός έλεγχος και πλήρης απολύμανση (Kudlek, et al., 2025).

Η επεξεργασία του βρόχινου νερού για πόση εφαρμόζεται σε περιπτώσεις κατά τις οποίες άλλες πηγές φυσικού νερού είναι σοβαρά περιορισμένες ή εξαντλημένες, μέσω της χρήσης συστημάτων συλλογής, αποθήκευσης και επεξεργασίας βρόχινου νερού. Τα εν λόγω συστήματα συνήθως περιλαμβάνουν διεργασίες διήθησης (χρησιμοποιώντας κοκκώδη ενεργό άνθρακα (GAC), φίλτρα, μεμβρανικά φίλτρα, αντίστροφη ώσμωση) και απολύμανσης (χλωρίωση, υπεριώδης ακτινοβολία, απολύμανση με ασήμι). Το επεξεργασμένο νερό μπορεί να αποθηκεύεται σε υπό πίεση ή μη δεξαμενές (Mazurkiewicz, 2022)

## 2.4 Απορροή Όμβριων Υδάτων

### 2.4.1 Φυσικοχημικά χαρακτηριστικά

Το νερό από την απορροή όμβριων προκύπτει από το νερό της βροχής ή το λιώσιμο του χιονιού που ρέει πάνω από το έδαφος και καταλήγει σε κοντινούς ποταμούς, λίμνες, ρέματα και ωκεανούς. Η απορροή όμβριων υδάτων αποτελεί ένα σημαντικό υδρολογικό φαινόμενο, το οποίο αναφέρεται στην κίνηση του νερού που προκύπτει από τη βροχόπτωση, καθώς ρέει πάνω από την επιφάνεια του εδάφους και συγκεντρώνεται σε ποτάμια, λίμνες και ωκεανούς. Μεγάλο μέρος των όμβριων απορροφάτε από το έδαφος και ενισχύει τον υδροφόρο ορίζοντα. Ωστόσο, σε αστικές περιοχές, λόγω των αυξημένων μη διαπερατών επιφανειών, δημιουργούνται υψηλές αιχμές απορροής και αυξημένοι νερού, καθώς οι δυνατότητες διήθησης είναι μειωμένες (Kumar, et al., 2024). Οι πλημμύρες σε μεγάλα αστικά κέντρα αποτελούν παγκόσμιο πρόβλημα καθιστώντας τη διαχείριση των όμβριων υδάτων ολοένα και πιο σημαντική, καθώς η κλιματική αλλαγή εντείνει τη συχνότητα και την ένταση των ακραίων καιρικών φαινομένων. Συνεπώς, είναι κρίσιμη η εφαρμογή λύσεων διαχείρισης που εναρμονίζονται με το περιβάλλον (Ayda, 2024).

Μετά την κατακρήμνιση, το βρόχινο νερό ρέει πάνω από διάφορες επιφάνειες, όπως δρόμοι, στέγες και έδαφος, αποκτώντας ρύπους. Περιλαμβάνει ποικιλία ρύπων, με κύριες πηγές ρύπανσης τα λύματα, διάβρωση ιζημάτων, λύματα δρόμων και κατασκευαστικά απόβλητα. (Kumar, et al., 2024). Περιέχει μια μεγάλη ποικιλία ουσιών, με τις συγκεντρώσεις τους να εξαρτώνται από τη γεωγραφική θέση, τις περιόδους βροχών και τη διαδρομή του νερού έως τη συλλογή τους (Razguliaev, 2024). Η απορροή όμβριων υδάτων περιέχει κυρίως σκόνη, ιζήματα, θρεπτικά συστατικά όπως άζωτο και φώσφορο (N και P), βαρέα μέταλλα, οργανικούς μικρορύπους, παθογόνα και ρύπους, όπως αιωρούμενα στερεά (Suspended Solids-SS), τα οποία δημιουργούνται από διάβρωση σε κατασκευαστικές δραστηριότητες, φυτική αποσύνθεση, γεωργικά χωράφια, βιομηχανικά απόβλητα, εκπομπές καυσαερίων, μη ασφαλτοστρωμένες επιφάνειες και αλάτι δρόμου. Η παρουσία των SS στο νερό μειώνει τη διείσδυση του φωτός και τη φωτοσύνθεση, οδηγώντας σε χαμηλή παραγωγή ενέργειας και διαλυμένο οξυγόνο (DO), κάτι που απειλεί τα οικοσυστήματα (Armin Azad, 2024).

Όπως αναφέρεται στον πίνακα 6 για τις αστικές απορροές, η συγκέντρωση των TSS και COD είναι υψηλότερη στα βιομηχανικά και οικιστικά αποχετευτικά συστήματα, με τα πιο συνηθισμένα βαρέα μέταλλα να είναι ο Cu, ο Pb και ο Zn. Οι ρύποι αυτοί μολύνουν τα φυσικά υδάτινα συστήματα, προκαλώντας σοβαρά προβλήματα ποιότητας νερού, όπως ευτροφισμό (Basanta Kumar Biswal, 2022). Στον πίνακα 6 παρατίθενται τα χαρακτηριστικά της απορροής αστικών περιοχών, όπου η ποσότητα και η ποιότητα εξαρτώνται από πολλούς υδρολογικούς και περιβαλλοντικούς παράγοντες, όπως βροχόπτωση, τοπογραφία και χρήση γης.

**Πίνακας 6** Χαρακτηριστικά ποιότητας αστικών υδάτων απορροής σε διαφορετικές λεκάνες απορροής και διαφορετικές περιοχές (Kumar, et al., 2024) (Liu, 2020).

Χώρος Μελέτης	TSS (mg/L)	BOD (mg/L)	COD (mg/L)	PO <sub>4</sub> -P (mg/L)	TP (mg/L)	NO <sub>3</sub> -N (mg/L)	NH <sub>4</sub> -N (mg/L)	TKN (mg/L)	TN (mg/L)	Μέταλλα (μg/L)	Αριθμός επεισοδίων Καταγίδας
Ναντζίνγκ, Κίνα	-	-	220	-	0.5	4	2	-	-	Pb 0.4	
Λεκάνη Mustoja, Ταλίν, Εσθονία	33.6–288	-	-	-	0,5-2,7	-	-	-	-	-	3
Υδρολογική λεκάνη Futian, νότια Γκουανγκντόγκ, Κίνα	258–1985	28-280	58-500	-	0,03-12,91	-	-	-	2-8,3	-	7
Κατοικημένη περιοχή Τσόντζου, Κορέα	192	83	196	-	1.96	-	-	6.76	-	Cu 58 Cr 54 Pb 173	4
Τεζόν, (Ροή σε ξηρές καιρικές συνθήκες) Κορέα	26–81	6,3-21,7	59-247	0,06-1,2	2,9-7,8	0,08-0,25	-	5,9-13,4	-	-	-
Τεζόν, (Ροή σε υγρές καιρικές συνθήκες) Κορέα	12–874	51-254	70-1455	-	1,14-10,06	2,4-13,7	-	0,02-3,21	7,3±4	-	34
Τσονγκκίνγκ, Κίνα	110 ± 91	-	139±86	-	0,27±0,2	-	-	-	6,65±6,23	Cu 100±50 Pb 590±130 Zn 650±470	10

Λεκάνη Σιοσέπολ, πόλη Ισφαχάν, Ιράν	161 ±133	-	561±713	-	0,27±0,2	-	-	-	6,65±6,23	Pb 278±221 Zn 342±737	
Τζοχόρ Μπαχρού, Μαλαισία	187 ±158	33±34	139±104	0,04±0,0 79	-	0,65±0,55	-	2,23±1,35	-	Cu 150±160 Pb 10 Zn 160±100 Ni 10±10	3
Βίλα Καμπιάσο, Πανεπιστήμιο Γένοβας, (Ροή από δρόμους), Ιταλία	15-377	-	11-281	-	-	-	-	-	-	Cu 0,1-53 Pb 6,1-23 Zn 27-123	12
Πολιτεία Κουίνσλαντ, Αυστραλία	146±127	-	73	0.14	0,2±0,3	-	-	1.9	3,6±6	Cu 33 Pb 144 Zn 135	-
Πυκνοκατοικημέ νή περιοχή, Γερμανία	66-937	2-36	63-146	-	0,23-0,34	0-16	0,5-2,3	-	-	Cu 97-104 Cr 6-50 Pb 11-525 Zn 120-2000 Ni 4-70	-
Λεκάνη παρατήρησης ΟΡΥΚΤΩΝ, (Συνδυασμένη ροή σε υγρές καιρικές συνθήκες), Παρίσι	121-519	81-290	190-682	-	-	-	-	15-39	-	-	27
Πόλη του Σασκατούν, Καναδάς	190	-	100	-	0.53	-	-	2.5	-	-	26
Τρεις λεκάνες (Σούσι-εν- Μπρι, Νοϊ-λε-	11-430	-	14-320	-	0,3-3,52	-	-	<2-16	-	Cu 3-220 Pb <10-129 Zn 130-520	20

Γκραν, ΖΑC Paris River Gauche), Παρίσι						-	-					
Ρουκί, Κατοικημένη (Δρόμος), Ινδία	504±512	64±47	106±72	1,23±0,6 5	2.56	3,44±1,22	-	-	-	-	Cu 76±53 Zn 161±875	17
Ρουκί, Κατοικημένη (Ανοιχτός χώρος), Ινδία	1100±1196	72±61	129±96	1,93±1,5 4	-	3,22±1,31	-	-	-	-	Cu 108±42 Zn 131±55	17
Πατιάλα, Ινδία	11-325	7,8±38,5	30-380	-	0,46-0,97	-	-	4,5-12,2	-	-	Cu 60-120 Zn 202-740	6
Ράιπούρ, Ινδία	-	-	-	-	-	12-168	8,0-23,0	-	-	-	-	15
Νέο Δελχί, Ινδία	276-472	41-61	40-242	-	-	-	-	6,8-10,3	-	-	-	3
Κράιστσερτς, Νέα Ζηλανδία	2-58,00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Cu 1-248 Zn 86-5920	7
Περιοχή Πούλια, Νότια Ιταλία	6-86,4	-	-	-	0,03-0,11	-	-	-	-	-	-	7
Αλμπέρτα, Καναδάς	45	-	-	-	1	-	-	-	-	-	Cu 7 Zn 20 Al 44 Fe 27	6

-- = μη διαθέσιμα αποτελέσματα

Οι τιμές στον πίνακα 6 αντικατοπτρίζουν την επίδραση διαφορετικών ανθρωπογενών και φυσικών παραγόντων στη ρύπανση των υδάτων. Οι κυρίαρχες παράμετροι είναι τα TSS και COD στις βιομηχανικές περιοχές και τα βαρέα μέταλλα, όπως ο Cu και ο Zn. Περιοχές όπως η λεκάνη Futian δείχνουν σοβαρή επιβάρυνση σε TSS, ενώ η περιοχή Τεζόν έχει την μεγαλύτερη συγκέντρωση σε COD, πιθανώς λόγω βιομηχανικών και αστικών δραστηριοτήτων. Αντίθετα, περιοχές όπως η Αλμπέρτα, Καναδάς και η περιοχή Πούλια, Ιταλία εμφανίζουν χαμηλή ρύπανση, γεγονός που υποδηλώνει καλύτερη διαχείριση υδάτινων πόρων. Πιο συγκεκριμένα μέγιστες τιμές εμφανίζονται, στη λεκάνη Futian, Κίνα η παράμετρος TP, η παράμετρος TSS και η παράμετρος COD και στο Τεζόν, Κορέα η παράμετρος TN. Βάσει της οδηγίας για τα πρότυπα του νερού παρατηρείτε αυξημένη συγκέντρωση σε Pb

Διάφορα βακτήρια, παθογόνα, οργανικές ενώσεις, και χλωρίδα μεταφέρονται μέσω των επιφανειών. Ο πίνακας 7 δείχνει ότι οι συγκεντρώσεις των μικροοργανισμών μειώνονται καθώς προχωράμε από τα αστικά λύματα προς τα επιφανειακά νερά. Επιφανειακά ύδατα θεωρούνται τα ποτάμια, οι λίμνες, τα ρέματα ή οι δεξαμενές. Όμβρια ύδατα είναι τα νερά της βροχής που ρέουν πάνω σε αστικές επιφάνειες, όπως δρόμοι και στέγες, ενώ απορροή αναφέρεται κυρίως στη ροή νερού πάνω από γεωργικές ή φυσικές επιφάνειες.

**Πίνακας 7** Η συγκέντρωση δεικτών βακτηρίων και παθογόνων σε λύματα, επιφανειακά νερά, όμβρια ύδατα και απορροές (Sánchez, et al., 2015).

Ρύποι	Αστικά λύματα (N/L)	Επιφανειακά ύδατα (N/L)	Απορροή όμβριων υδάτων (N/L)	Νερό απορροής (N/L)
Βακτήρια-δείκτες:				
E. Coli και εντερικοί εντερόκοκκοι	$10^6-10^{10}$	$10^0-10^5$	$10^0-10^5$	$10^0-10^4$
Campylobacter	$10^2-10^8$	$10^2-10^4$	$10^{-1}-10^2$	$0-10^2$
Cryptosporidium	$10^0-10^4$	$10^{-1}-10^2$	$10^{-1}-10^0$	$0-10^0$
Giardia	$10^0-10^4$	$10^{-1}-10^3$	$10^{-1}-10^1$	$10^{-1}-10^0$
Norovirus	$10^0-10^4$	$10^1-10^3$	$0-10^3$	–
Enterovirus	$10^0-10^4$	$10^{-2}-10^1$	$0-10^4$	–
Legionella	$0-10^5$	-	$0-10^4$	$0-10^4$

– = μη διαθέσιμα

Σύμφωνα με τον πίνακα, οι υψηλότερες συγκεντρώσεις βακτηρίων και παθογόνων παρατηρούνται στο νερό αποβλήτων, όπου οι τιμές είναι κατά πολύ μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες στα επιφανειακά νερά, στις απορροές όμβριων υδάτων και στο νερό απορροής. Ειδικότερα, τα E. Coli και εντερικοί εντερόκοκκοι καταγράφουν τη μεγαλύτερη συγκέντρωση στο νερό αποβλήτων ( $10^6-10^{10}$  N/L), ενώ επίσης εμφανίζονται σε υψηλές τιμές και στα επιφανειακά νερά ( $10^0-10^5$  N/L) και στις απορροές όμβριων υδάτων ( $10^0-10^5$  N/L), που τα όρια της Οδηγία 2020/2184/ΕΕ είναι 0.

Σύμφωνα με τους Steele, et al., 2018 η συχνότητα ανίχνευσης παθογόνων διαφέρει ανάλογα με την περιοχή. Πιο συγκεκριμένα, συλλέχθηκαν δείγματα όμβριων υδάτων από μία και μόνο θέση δειγματοληψίας σε καθεμία από τις δύο υπό μελέτη λεκάνες απορροής: στον ποταμό Σαν Ντιέγκο και στο ρέμα Τουρμαλίνης, που βρίσκονται στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής.

Τα αποτελέσματα καταδεικνύουν υψηλή συχνότητα εμφάνισης συγκεκριμένων παθογόνων, όπως ο *Neisseria* II και τα είδη του γένους *Campylobacter*, ιδίως στην περιοχή του ποταμού Σαν Ντιέγκο . Αντίθετα, άλλα παθογόνα, όπως η *Salmonella*, παρουσιάζουν χαμηλότερα ποσοστά ανίχνευσης, με 0.25 συχνότητα ανίχνευσης παθογόνων και δεικτών προέλευσης στον ποταμό Σαν Ντιέγκο και 0.10 στο ρέμα Τουρμαλίνης.

Η διακύμανση των ποσοστών ανίχνευσης ανάμεσα στις δύο λεκάνες απορροής υποδηλώνει διαφοροποιημένα επίπεδα μικροβιακής επιβάρυνσης, πιθανώς ως αποτέλεσμα διαφορών στη χρήση γης, στην ένταση των ανθρώπινων δραστηριοτήτων ή στις πηγές ρύπανσης. Τα δεδομένα αυτά υπογραμμίζουν τη σημασία της παρακολούθησης της ποιότητας των υδάτων στις λεκάνες απορροής, καθώς και της λήψης κατάλληλων μέτρων προστασίας της δημόσιας υγείας και του περιβάλλοντος (Steele, et al., 2018).

#### **2.4.2 Επεξεργασία**

Οι κύριοι στόχοι της επεξεργασίας των όμβριων υδάτων περιλαμβάνουν τη μείωση του ρυπαντικού φορτίου, μέσω της απομάκρυνσης αιωρούμενων σωματιδίων, ιζηματογενών ρύπων, ελαίων, αζωτούχων ενώσεων, φωσφορικών αλάτων και μικροβιολογικών ρύπων.

Η παραδοσιακή επεξεργασία των αστικών όμβριων υδάτων είναι μια οικονομική, παθητική και αποκεντρωμένη μέθοδος ελέγχου, η οποία μιμείται την προ-ανάπτυξη υδρολογίας της τοποθεσίας και βελτιώνει τους δείκτες ποιότητας νερού, όπως τα αιωρούμενα στερεά (TSS), η θολερότητα, τα θρεπτικά συστατικά και οι δείκτες κοπρανώδης μόλυνσης μέσω της απομάκρυνσης αιωρούμενων σωματιδίων. Ωστόσο, παραδοσιακά μέτρα ελέγχου των όμβριων υδάτων είναι γενικά αναποτελεσματικά στην απομάκρυνση των διαλυτών συστατικών, ειδικότερα των διαλυτών μετάλλων και οργανικών ρύπων ιχνοστοιχείων (Pritchard, 2024).

Μία από τις σημαντικότερες προκλήσεις που αντιμετωπίζουν οι σύγχρονες πόλεις είναι η εξεύρεση βέλτιστων, βιώσιμων, οικονομικά αποδοτικών και περιβαλλοντικά φιλικών λύσεων για τη διαχείριση των όμβριων υδάτων σε ανεπτυγμένες αστικές περιοχές. Μερικές μέθοδοι επεξεργασίας και διαχείρισης για τη βελτίωση της ποιότητας των όμβριων υδάτων, με φυσικούς τρόπους, περιλαμβάνουν συστήματα διήθησης, δεξαμενές συγκράτησης και κατακράτησης για τη διαχείριση των υδάτων απορροής, καθώς και τις πράσινες υποδομές όπως οι κήποι βροχής (Köiv-Vainik, 2022).

Άλλες συνηθισμένες διαθέσιμες μέθοδοι επεξεργασίας είναι με συστήματα συλλογής όμβριων υδάτων και περιλαμβάνουν τη χρήση δεξαμενών καθίζησης, απολύμανση σε συνδυασμό με μεμβρανικά φίλτρα, αντίστροφη όσμωση με θερμική επεξεργασία, απολύμανση καθώς και χλωρίωση.

Επιπλέον, η χρήση ιόντων αργύρου σε συνδυασμό με συμβατικά μέσα φιλτραρίσματος και καθίζησης αποτελεί μια προσιτή μέθοδο που προσφέρει καλά αποτελέσματα . Τέλος, συστήματα σημειακής χρήσης, όπως οι λάμπες υπεριώδους ακτινοβολίας και η απολύμανση με όζον αποτελούν μια αναδυόμενη τάση στην επεξεργασία του νερού για σκοπούς πόσης (Sánchez, et al., 2015).

## 2.5 Αστικά Λύματα

### 2.5.1 Χαρακτηριστικά

Η διαχείριση των λυμάτων αποτελεί μια σοβαρή πρόκληση, καθώς κάθε ανθρώπινη δραστηριότητα που χρησιμοποιεί νερό παράγει λύματα, τα οποία όχι μόνο επηρεάζουν την ποιότητα των επιφανειακών και υπόγειων υδάτων, αλλά και το περιβάλλον γενικότερα. Η συνεχής αύξηση της παγκόσμιας ζήτησης για νερό επιφέρει ταυτόχρονα αύξηση της ποσότητας των λυμάτων και του συνολικού φορτίου ρύπανσης.

Παγκοσμίως, υπολογίζεται ότι πάνω από το 80% των λυμάτων απορρίπτονται στο περιβάλλον χωρίς να έχουν υποστεί επεξεργασία, εξαιτίας των ποικίλων ρύπων που απελευθερώνονται από διάφορες πηγές, όπως οικιακές, βιομηχανικές, εμπορικές και θεσμικές δραστηριότητες. Η σύνθεση των αστικών λυμάτων μπορεί να είναι ιδιαίτερα ετερογενής, περιλαμβάνοντας μια ποικιλία ρύπων, από οργανικές και ανόργανες ουσίες μέχρι βαρέα μέταλλα και μικροοργανισμούς όπως *E. Coli* και εντερικοί εντερόκοκκοι (Omer Khalid, 2024).

Τα αστικά λύματα κατηγοριοποιούνται σε δύο βασικές κατηγορίες: τα γκρι ύδατα (που προέρχονται κυρίως από καθημερινές οικιακές χρήσεις νερού, όπως το ντους και το πλύσιμο των ρούχων) και τα μαύρα ύδατα (που προέρχονται κυρίως από τις τουαλέτες και περιέχουν ανθρώπινα απόβλητα).

Η τυπική χημική σύσταση των λυμάτων που παρουσιάζει ενδιαφέρον περιλαμβάνει τις παροχές, το Ph, τα ολικά αιωρούμενα στερεά (TSS), τα ολικά διαλυμένα στερεά (TDS), τη βιολογικά απαιτούμενη ποσότητα οξυγόνου (BOD), τη χημικά απαιτούμενη ποσότητα οξυγόνου (COD), το ολικό άζωτο (TN), τον ολικό φώσφορο (TP), την αμμωνία, τα νιτρικά, τα νιτρώδη και τα μεταλλικά στοιχεία (Soo, et al., 2025).

Βάση των Gholami-Borujeni, 2018, Omer Khalid, 2024 και Javed, et al., 2025, εξετάζονται οι συγκεντρώσεις ρύπων σε διάφορους τύπους λυμάτων. Κυριαρχούν οι συγκεντρώσεις λιπών, ελαίων και γρασαρίσματος FOG, COD, BOD, TSS και TP σε λύματα προερχόμενα από διάφορες πηγές και χώρες. Τα δεδομένα αυτά προέκυψαν από αναλύσεις δειγμάτων ακατέργαστων λυμάτων εισροών που συλλέγονταν σε εβδομαδιαία βάση στο δημοτικό εργοστάσιο επεξεργασίας λυμάτων στο Σβεντάλα της Σουηδίας (Omer Khalid, 2024) καθώς και τα χαρακτηριστικά του εργοστασίου επεξεργασίας λυμάτων της Ουρμίας στο Ιράν (Gholami-Borujeni, 2018). Οι υπόλοιπες συγκεντρώσεις προέρχονται από οικιακά λύματα, όπως απόβλητα πλυντηρίου και λιποσυλλέκτες, καθώς και από βιομηχανικές ή επαγγελματικές εγκαταστάσεις, όπως καφετέριες (Javed, et al., 2025).

Η ποιότητα των οικιακών λυμάτων επηρεάζεται από την παρουσία λιπαντικών ελαίων, χρωμάτων, φυτοφαρμάκων, μαγειρικών ελαίων και καθαριστικών προϊόντων. Αντίθετα, τα βιομηχανικά λύματα παρουσιάζουν σημαντικές διαφοροποιήσεις ως προς τη σύστασή τους, ανάλογα με τις εκάστοτε βιομηχανικές διεργασίες και τις πρώτες ύλες που χρησιμοποιούνται. Η παρουσία FOG στα λύματα αυξάνει την περιεκτικότητα σε οργανικό άνθρακα, γεγονός που οδηγεί άμεσα σε υψηλότερες τιμές COD και BOD (Javed, et al., 2025).

Παρατηρείται ότι οι υψηλότερες συγκεντρώσεις εντοπίζονται στα απόβλητα καφετέριας στο Ηνωμένο Βασίλειο, με ιδιαίτερα αυξημένες τιμές σε πολλές παραμέτρους, όπως το COD και το BOD. Παράλληλα, τα λύματα της Ουρμίας παρουσιάζουν επίσης σημαντική ρύπανση, με ιδιαίτερα υψηλές συγκεντρώσεις σε ολικά αιωρούμενα στερεά (TSS). Είναι εμφανές ότι οι συγκεντρώσεις των παραμέτρων αυτών παρουσιάζουν διακυμάνσεις, ανάλογα με την προέλευση των λυμάτων, τόσο ως προς την πηγή όσο και ως προς τη γεωγραφική τοποθεσία.

### **2.5.2 Επεξεργασία**

Η επεξεργασία λυμάτων αποτελεί κρίσιμο μέρος της περιβαλλοντικής διαχείρισης, προστατεύοντας τους υδάτινους πόρους και την ανθρώπινη υγεία. Η αύξηση των λυμάτων και η έλλειψη κατάλληλης υποδομής οδηγούν σε ρύπανση των υδάτων. Οι παραδοσιακές μέθοδοι επεξεργασίας (φυσικές, χημικές, βιολογικές) έχουν ορισμένα όρια, όπως η παραγωγή δευτερογενών αποβλήτων και η ενεργειακή κατανάλωση. Για καλύτερα αποτελέσματα, αναπτύσσονται προχωρημένες τεχνικές, όπως οι μέθοδοι διαχωρισμού μεμβρανών, οι οποίες προσφέρουν υψηλή αποδοτικότητα και χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας. Συχνά απαιτείται συνδυασμός τεχνικών (υβριδικές ή ολοκληρωμένες διεργασίες) για την καλύτερη αντιμετώπιση των σύγχρονων προκλήσεων στην επεξεργασία λυμάτων και την ανάκτηση χρήσιμων παραπροϊόντων (Tripathy, et al., 2025).

Οι κύριοι στόχοι της επεξεργασίας των αστικών λυμάτων περιλαμβάνουν την απομάκρυνση της οργανικής και ανόργανης ρύπανσης, προκειμένου να αποφευχθούν περιβαλλοντικές επιπτώσεις, όπως ο υπερ-εμπλουτισμός και η ευτροφία, καθώς και η εξάλειψη παθογόνων μικροοργανισμών και επικίνδυνων ουσιών. Δεδομένου ότι παγκοσμίως τα λύματα περιέχουν περίπου 16,6 δισεκατομμύρια κιλά αζώτου, 3 δισεκατομμύρια κιλά φωσφόρου και 6,3 δισεκατομμύρια κιλά καλίου, θα μπορούσαν να καλύψουν το 13,4 % της παγκόσμιας κατανάλωσης λιπασμάτων και να τροφοδοτήσουν με ενέργεια 158 εκατομμύρια νοικοκυριά (Soo, et al., 2025).

Η επεξεργασία αποσκοπεί στην απομάκρυνση βαρέων μετάλλων, αιωρούμενων σωματιδίων και μικροβιολογικών ρύπων, καθώς και στη μείωση της οργανικής ρύπανσης (BOD, COD) και των θρεπτικών συστατικών (Omer Khalid, 2024). Στο πλαίσιο αυτό, ιδιαίτερη σημασία έχει και ο διαχωρισμός των διαλυμένων ελαίων, ο οποίος μπορεί να επιτευχθεί μέσω φυσικών, χημικών ή βιολογικών μεθόδων. Οι μέθοδοι αυτές είναι απαραίτητες για την αποτελεσματική μείωση της ρύπανσης από λίπη, έλαια και γράσα (FOG) και, κατ' επέκταση, για την προστασία του περιβάλλοντος (Javed, et al., 2025).

Πιο συγκεκριμένα, η διαδικασία επεξεργασίας λυμάτων στο δημοτικό εργοστάσιο του Σβεντάλα περιλαμβάνει πολυφασική επεξεργασία με στόχο την απομάκρυνση οργανικών και ανόργανων ρύπων. Αρχικά, στην πρωτοβάθμια φάση, απομακρύνονται μεγάλα στερεά και ιζήματα μέσω δεξαμενών άμμου και λιποσυλλεκτών. Ακολουθούν φυσικοχημικές διεργασίες για τη σταθεροποίηση και προετοιμασία των λυμάτων, με απομάκρυνση αιωρούμενων στερεών και άλλων σωματιδίων. Στη συνέχεια, εφαρμόζεται μεμβρανική διήθηση για την αφαίρεση διαλυμένων ρύπων, μειώνοντας σημαντικά τις τιμές της βιοχημικής και χημικής

ανάγκης οξυγόνου (BOD<sub>5</sub>, COD) και των θρεπτικών συστατικών. Τέλος, ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΑ βήματα καθαρισμού διασφαλίζουν την ποιότητα της εκροής για απόρριψη σε επιφανειακά ύδατα ή επαναχρησιμοποίηση, με συνολικές μειώσεις ρύπων που σε αρκετές περιπτώσεις υπερβαίνουν το 90% (Omer Khalid, 2024).

Οι συμβατικές μονάδες επεξεργασίας λυμάτων (WWTPs) μπορούν να απομακρύνουν σε μεγάλο βαθμό ρύπους όπως το E. coli, βαρέα μέταλλα και άλλους ρύπους. Για την απομάκρυνσή τους χρησιμοποιούνται τεχνολογίες όπως η προσρόφηση, η προηγμένη οξειδωση και η διήθηση με μεμβράνες (Matesun, et al., 2024).

Η μονάδα επεξεργασίας λυμάτων στην Ουρμιά (Ιράν) χρησιμοποιεί το σύστημα Biolac, το οποίο περιλαμβάνει μηχανικές σχάρες για την αφαίρεση μεγάλων στερεών, μέτρηση παροχής και δεξαμενές άμμου για την απομάκρυνση λεπτών σωματιδίων. Η βιολογική επεξεργασία στο σύστημα Biolac υλοποιείται σε πέντε στάδια: αφαίρεση φωσφόρου, αερισμός, καθίζηση, δευτερογενής αερισμός και τελικός καθαρισμός. Η εκροή απολυμαίνεται πριν την απόρριψη για τη μείωση μικροβιακών κινδύνων. Το σύστημα επιτυγχάνει σημαντικές μειώσεις σε BOD<sub>5</sub>, COD, TSS, νιτρικά και φωσφόρο, αποδεικνύοντας την αποδοτικότητα των βιολογικών και χημικών διεργασιών (Gholami-Borujeni, 2018).

Στον πίνακα 8 παρουσιάζονται τα ποσοστά βελτίωσης διαφόρων παραμέτρων επεξεργασμένων λυμάτων για τις δύο περιοχές, Ουρμιά (Ιράν) και Σβεντάλα (Σουηδία).

**Πίνακας 8** Χαρακτηριστικά επεξεργασμένων λυμάτων.

Περιοχή	Θολότητα (NTU)	BOD <sub>5</sub> (mg/l)	COD (mg/l)	TSS (mg/l)	TOC (mg/l)	Νιτρικά Ιόντα (mg/l)	TP (mg/l)	P (mg/l)	Πηγές
Ποσοστό Βελτίωσης (%) Ουρμιάς, Ιράν		93,8%	93,8%	94,5%		82,9%		68,8%	(Gholami-Borujeni, 2018)
Ποσοστό Βελτίωσης (%) Σβεντάλα, Σουηδίας	99,9%		96%	100%	94,7%		92,9%		(Omer Khalid, 2024)

Συγκριτικά, η μονάδα της Σουηδίας εμφανίζει υψηλότερα ποσοστά απομάκρυνσης σε όλες τις παραμέτρους. Ειδικότερα, η απομάκρυνση των αιωρούμενων στερεών (TSS) στη Σβεντάλα φτάνει το 100%, ενώ στην Ουρμιά είναι 94,5%, δείχνοντας εξαιρετική αποτελεσματικότητα στη συγκράτηση σωματιδίων. Η απομάκρυνση του BOD<sub>5</sub> και του COD, που σχετίζονται με τη βιολογική και χημική ζήτηση οξυγόνου, είναι επίσης αυξημένη στη Σουηδία (96% και 94,7% αντίστοιχα), συγκριτικά με την Ουρμιά (93,8% και 93,8%). Σημαντική διαφορά εντοπίζεται και στα νιτρικά ιόντα, όπου η Σβεντάλα επιτυγχάνει απομάκρυνση 94,7%, έναντι 82,9% στην Ουρμιά, υποδηλώνοντας καλύτερη λειτουργία απονιτροποίησης.

## 2.6 Γκρίζο Νερό

### 2.6.1 Χαρακτηριστικά διαφορετικών πηγών

Τα γκρίζα ύδατα αποτελούν το 60–75% των αστικών λυμάτων, που προέρχονται από νεροχύτες κουζίνας, πλυντήρια, νιπτήρες και ντουζιέρες και θεωρούνται μεγάλης ποσότητας, χαμηλής έντασης απόβλητα με υψηλό δυναμικό επαναχρησιμοποίησης. Ποσοτικά, το πλυντήριο ρούχων συμβάλλει περίπου στο 25% των γκρίζων υδάτων, ενώ περίπου το 27% προέρχεται από τον νεροχύτη της κουζίνας και το πλυντήριο πιάτων, και το υπόλοιπο 47% από νιπτήρες, μπάνια και ντους. Αν και τα γκρίζα ύδατα περιέχουν παθογόνα, δεν περιλαμβάνουν κόπρανα και ούρα.

Τα χαρακτηριστικά των γκρίζων υδάτων, διαφοροποιούνται ανάλογα με την πηγή προέλευσής τους: μπάνιο, πλυντήριο ρούχων, κουζίνα και μικτή προέλευση και επηρεάζονται από την ποιότητα και το είδος του νερού παροχής. Αποτελούνται περίπου από 30% οργανικά συστατικά και 9–20% θρεπτικά στοιχεία. Το pH τους είναι συνήθως πιο αλκαλικό σε σχέση με τα κοινά λύματα. Περιέχουν διάφορους ρύπους, όπως βαρέα μέταλλα, προϊόντα προσωπικής φροντίδας και ξενικές χημικές ενώσεις από σαπούνια και καλλυντικά (Agnihotri, et al., 2025)..

Πιο συγκεκριμένα έχουν χαμηλή συγκέντρωση COD, N και P και μεγάλη ποσότητα TSS. Ο παρακάτω πίνακας 9 παρουσιάζει τη συγκέντρωση των TS, TSS, VSS, COD<sub>t</sub>, COD<sub>s</sub>, BOD<sub>5</sub> και των θρεπτικών συστατικών σε διαφορετικές πηγές γκρίζων υδάτων σύμφωνα με (Noutsopoulos., et al., 2018) από μια ερευνά που διενεργήθηκε για 60 δείγματα στην Αθήνα, Ελλάδα και η διάρκεια της διαδικασίας δειγματοληψίας ήταν τέσσερις μήνες (από Ιανουάριο έως Απρίλιο). Τα δείγματα αναλύθηκαν για τις παραμέτρους που περιγράφονται στην Ενότητα για γκρι νερό από διαφορετικές πηγές. Το GW-Τυρε αναφέρεται σε ελαφριά (A) έως βαριά (D) γκρίζα ύδατα.

**Πίνακας 9** Χαρακτηρισμός πολλών πηγών γκρίζου νερού και φυσικών χαρακτηριστικών, οργανικός άνθρακας, στερεά και θρεπτικά συστατικά (μέσες τιμές ± τυπική απόκλιση) (Noutsopoulos., et al., 2018)

Γκρίζο Νερό	pH	TS	TSS	VSS	COD <sub>t</sub>	COD <sub>s</sub>	BOD <sub>5</sub>	NH <sub>4</sub> -N	NO <sub>2</sub> -N	TKN	TN	TP
Μονάδες		(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)
Μπανιέρα/ ντους	7.5 ± 0.1	325 ± 55	73.5 ± 38	69.2 ± 35	390 ± 125	193 ± 113	263 ± 83	0.53 ± 0.28	12 ± 11	2.6 ± 2.2	2.7 ± 2.2	0.10 ± 0.14
Νιπτήρας χειρός	7.6 ± 0.2	373 ± 96	90.5 ± 68	58.9 ± 48	427 ± 192	272 ± 203	305 ± 129	0.33 ± 0.50	<10	2.3 ± 2.0	2.5 ± 1.9	1.3 ± 2.0
Κουζίνα	6.9 ± 0.4	883 ± 426	319 ± 209	314 ± 205	1119 ± 476	518 ± 225	831 ± 358	0.20 ± 0.26	20 ± 17	5.5 ± 4.8	6.5 ± 5.0	2.7 ± 3.1
Πλυντήριο	8.3 ± 0.8	1085 ± 608	169 ± 96	139 ± 90	2072 ± 1401	1165 ± 920	1363 ± 950	1.4 ± 1.1	75 ± 56	5.5 ± 5.2	6.2 ± 5.3	1.2 ± 0.81

Πλυντήριο πιάτων	10 ± 0.2	2535 ± 1053	11 ± 1.3	10 ± 0.5	411 ± 59	307 ± 3	184.6 ± 24	0.11 ± 0.07	0.05 ± 0.01	<0.5	<0.5	187 ± 51
GW-Type A	-	336 ± 50	77.3 ± 31	66.8 ± 27	398 ± 112	210 ± 113	272 ± 73	0.48 ± 0.28	<10	2.5 ± 1.9	2.6 ± 1.9	0.37 ± 0.61
GW-Type B	-	548 ± 140	103 ± 31	87.4 ± 24	873 ± 346	481 ± 297	582 ± 242	0.75 ± 0.53	30 ± 25	3.4 ± 2.1	3.6 ± 2.1	0.61 ± 0.52
GW-Type C	-	600 ± 133	101 ± 65	85 ± 60	861 ± 286	476 ± 259	571 ± 233	0.73 ± 0.43	30 ± 20	3.3 ± 2.7	3.6 ± 2.7	5.43 ± 1.5
GW-Type D	-	684 ± 151	166 ± 70	154 ± 63	939 ± 260	489 ± 232	649 ± 213	0.57 ± 0.40	30 ± 18	4.0 ± 2.6	4.4 ± 2.7	4.6 ± 0.9
Μικτό γκρίζο νερό μπάνιου	-	-	-	-	471 ± 57	235 ± 5	248 ± 27	-	<10	8.8 ± 0.3	-	0.82 ± 0.22

-: μη διαθέσιμα αποτελέσματα

Ο πίνακας 10 καταδεικνύει ότι το νερό από πλυντήρια πιάτων έχει πολύ υψηλή συγκέντρωση σε TS και TP, ενώ από πλυντήρια ρούχων παρουσιάζει υψηλές τιμές ζήτησης οξυγόνου (COD<sub>t</sub>, COD<sub>s</sub>, BOD<sub>5</sub>) και θρεπτικών συστατικών (NH<sub>4</sub>-N, NO<sub>2</sub>-N, και TKN). Αντίθετα, το βαριάς κατηγορίας γκρι νερό παρουσιάζει διπλάσια συγκέντρωση ζήτησης οξυγόνου από το ελαφρύ γκρι νερό.

Τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά των γκρι νερών διαφέρουν, ανάλογα με την προέλευσή τους και παρουσιάζουν υψηλές τιμές σε παραμέτρους όπως τα TDS, BOD, COD, TSS, τα θρεπτικά συστατικά και οι επιφανειοδραστικές ουσίες. Ο Πίνακας 10 συνοψίζει τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά των γκρίζων νερών σε διάφορες γεωγραφικές περιοχές για διάφορες παραμέτρους. Είναι αξιοσημείωτο ότι οι υψηλότερες συγκεντρώσεις εντοπίζονται στις παραμέτρους των TSS, BOD, και Na. Οι διαφοροποιήσεις στις συγκεντρώσεις αποδίδονται στη διαφορετική περιβαλλοντική σύνθεση, την ποιότητα του νερού, το κλίμα και την αστική περιοχή. Στον πίνακα 11 παρουσιάζονται τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά του γκρίζου νερού στην Μαλαισία και στο Κάιρο.

**Πίνακας 10** Φυσικοχημικά χαρακτηριστικά του γκρίζου νερού

Παράμετρος	Μονάδες	Μαλαισία		Κάιρο	
		ελάχιστο	μέγιστο	ελάχιστο	μέγιστο
pH		6.06	8.38	5.77	7.96
Θερμοκρασία	(°C)	25	25	24.71	28.92
Θολότητα	NTU	37	173		
Συνολικά διαλυμένα στερεά (TDS)	mg/L	280	350	313	597
Συνολικά αιωρούμενα στερεά (TSS)	mg/L	16	2850	50	165
Συνολικά στερεά (TS))	mg/L	570	700		
Βιολογική ζήτηση οξυγόνου (BOD <sub>5</sub> )	mg/L	1354	1354	240	410
Χημική ζήτηση οξυγόνου (COD)	mg/L	92	5470	301	526

Συνολικός οργανικός άνθρακας (TOC)	mg/L	940	940		
Συνολικό άζωτο (N)	mg/L	8	11		
Συνολικός φώσφορος (P)	mg/L	0.89	11		
Αμμωνιακό άζωτο (NH <sub>3</sub> -N)	mg/L	0.6	26		
Νιτρικό άζωτο (NO <sub>3</sub> -N)	mg/L	0.5	3.1		
Συνολικό άζωτο Kiedjahl (TKN)	mg/L	0	0	18	32
Διαλυμένο οξυγόνο (DO)	mg/L	0.19	1.6		
Βάριο (Ba)	μg/L	15.5	21.8		
Ασβέστιο (Ca)	μg/L	31600	38000	151.41	437.61
Χρώμιο (Cr)	μg/L	2.06	5.46		
Χαλκός (Cu)	μg/L	47	70.2		
Σίδηρος (Fe)	μg/L	180	570		
Μόλυβδος (Pb)	μg/L	2.14	10		
Μαγνήσιο (Mg)	μg/L	5300	6220	83.22	140.01
Υδράργυρος (Hg)	μg/L	0.02	36		
Νάτριο (Na)	μg/L	61400	92400	265	420
Ψευδάργυρος (Zn)	μg/L	55.3	77.8		
Λάδια και γράσα	μg/L			35	90
Πηγή		(Leong, 2017)		(Tusiime, 2022)	

Η Μαλαισία παρουσιάζει υψηλότερες τιμές TSS, BOD, COD, βαρέα μέταλλα, Na και διαλυμένο οξυγόνο (DO) υποδεικνύοντας μεγαλύτερη οργανική ρύπανση και επίδραση από βιομηχανικές δραστηριότητες σε σύγκριση με το Κάιρο, ενώ τα TDS είναι αυξημένες στο Κάιρο. Εν κατακλείδι, η Μαλαισία έχει σοβαρότερα ζητήματα ποιότητας νερού που σχετίζονται με οργανική και βιομηχανική ρύπανση.

Επιπλέον, τα γκρίζα νερά είναι μολυσμένα με δείκτες κοπρανώδους μόλυνσης και παθογόνους οργανισμούς λόγω της διασταυρούμενης μόλυνσης από δραστηριότητες προσωπικής υγιεινής, το πλύσιμο ρούχων και την παρουσία φυσικών ή μολυσματικών οργανισμών στο ανθρώπινο δέρμα.

Στον πίνακα 11 καταγράφονται τα βακτήρια και οι δείκτες κοπρανώδους μόλυνσης από διάφορες πηγές και χώρες, και είναι εμφανές ότι υπάρχει υψηλή συγκέντρωση κοπρανώδους και συνολικών κολοβακτηριδίων. Ακόμα καταγράφονται και οι πηγές νερού LA = πλυντήριο ρούχων, WB = νιπτήρας, SH = ντους, BA= μπάνιο.

**Πίνακας 11** Δείκτες κοπρανώδους μόλυνσης και παθογόνα στο γκρίζο νερό.

Τοποθεσία	Ηνωμένο Βασίλειο	Αριζόνα, ΗΠΑ	Ισραήλ	Κουμπρί, Μπουρκίνα Φάσο	Παμπρέ, Μπουρκίνα Φάσο	Σαάμπα Μπουρκίνα Φάσο	Κομκί Μπουρκίνα Φάσο
Πηγή	SH, BA, WB	LA, WB, SH	SH, BA, WB	Μικτό	Μικτό	Μικτό	Μικτό
Δείκτες κοπρανώδ							

<b>οις μόλυνσης</b>							
E. coli	2.8			4.93	5.59	4.34	5
Κολοβακτη ρίδια κοπράνων		3.5-6.9	3.6				
Συνολικά κολοβακτη ρίδια	5.4	5.8-3.0		4.86	5.43		
Εντερόκοκκ οι	2.8						
<b>Παθογόνα βακτήρια</b>							
Clostridium	3.1		0.7				
Pseudomo nas	4.4	2.3-5.2	3.5				
Staphyloco ccus	3.4	0	4				
<b>Πηγή</b>	(Leong, 2017)	(Leong, 2017)	(Leong, 2017)	(Compaoré, 2024)	(Compaoré, 2024)	(Compaoré, 2024)	(Com paoré, 2024)

Οι υψηλότερες τιμές E. coli παρατηρούνται στο Παμπρέ και στο Κομκί Φάσο ενώ οι μεγαλύτερες συγκεντρώσεις παθογόνων βακτηρίων, όπως το Staphylococcus και το Clostridium, καταγράφονται στο Ισραήλ και στο Ηνωμένο Βασίλειο. Ο έλεγχος αυτών των παθογόνων είναι ιδιαίτερα κρίσιμος για την πρόληψη επιδημιών, κυρίως στις αναπτυσσόμενες περιοχές. Οι περιοχές του Μπουρκίνα Φάσο (ιδιαίτερα Πάμπρέ και Κουμκί) παρουσιάζουν υψηλότερες τιμές σε όλους σχεδόν τους δείκτες μικροβιακής μόλυνσης, γεγονός που υποδεικνύει αυξημένη μόλυνση. Αντίθετα, οι μετρήσεις από το Ηνωμένο Βασίλειο, την Αριζόνα και το Ισραήλ δείχνουν χαμηλότερα επίπεδα μόλυνσης. Γενικότερα οι αναπτυσσόμενες περιοχές (Φάσο) εμφανίζουν σημαντικά μεγαλύτερη μόλυνση σε σχέση με τις ανεπτυγμένες περιοχές (Ηνωμένο Βασίλειο, Αριζόνα, Ισραήλ).

### 2.6.2 Επεξεργασία

Η επεξεργασία του γκρίζου νερού στοχεύει στη μείωση του φορτίου στα δίκτυα συλλογής λυμάτων και στους σταθμούς επεξεργασίας. Κύριος στόχος είναι η απομάκρυνση βακτηρίων και άλλων μικροοργανισμών, η μείωση της θολότητας και της οσμής, καθώς και η απομάκρυνση των αιωρούμενων και στερεών σωματιδίων (TSS) και της οργανικής ύλης.

Τα γκρίζα νερά μπορούν εύκολα να υποστούν επεξεργασία και να επαναχρησιμοποιηθούν μέσω υπόγειας διήθησης χωρίς περιττή κατανάλωση ενέργειας, όπως σε μια μελέτη στην Συρία διαπιστώσαν ότι με την επαναχρησιμοποίησης του γκρίζου νερού θα μπορούσαν να μειώσουν ζήτηση πόσιμου νερού κατά 35% (Burn, et al., 2002).

Συνήθως περιλαμβάνει στάδια όπως τη συλλογή μέσω ξεχωριστών σωληνώσεων, τη διήθηση για απομάκρυνση στερεών, τη βιολογική διάσπαση οργανικών και άλλων ρύπων, και την απολύμανση, κυρίως με υπεριώδη ακτινοβολία. Χρησιμοποιούνται διάφορες τεχνικές, όπως φυσικές, χημικές, βιολογικές, φυσικοχημικές μέθοδοι, καθώς και προηγμένες τεχνολογίες απολύμανσης με υπεροξείδιο του υδρογόνου, χλώριο και ηλιακή ακτινοβολία. Η επιλογή των μεθόδων βασίζεται στα χαρακτηριστικά των γκρίζων υδάτων και τους στόχους επαναχρησιμοποίησης (Agnihotri, et al., 2025).

Στις περισσότερες περιπτώσεις, προηγείται ένα στάδιο διαχωρισμού στερεών-υγρών ως προεπεξεργασία, ενώ ακολουθεί ένα στάδιο απολύμανσης ως μετεπεξεργασία. Για την αποφυγή φραγών στα επόμενα στάδια επεξεργασίας, χρησιμοποιούνται μέθοδοι προεπεξεργασίας όπως σπητικές δεξαμενές, σάκοι φίλτρων, σχάρες και φίλτρα, με στόχο τη μείωση της ποσότητας σωματιδίων, ελαίων και λιπών. Η απολύμανση εφαρμόζεται για την κάλυψη των μικροβιολογικών απαιτήσεων της εκροής (Li, et al., 2009). Πιο συγκεκριμένα οι μέθοδοι επεξεργασίας περιλαμβάνουν τη διήθηση, προσρόφηση, αντίστροφη ώσμωση, αναερόβιο στρώμα ιλύος (up-flow Anaerobic Sludge Blanket), μεμβρανικούς βιοαντιδραστήρες (membrane bioreactor), φίλτρα υγρού στρώματος (trickling filters), ενεργή ιλύς και τεχνητούς υγροβιότοπους (CW). Οι τεχνολογίες που εφαρμόζονται για την επεξεργασία των γκρίζων νερών περιλαμβάνουν φυσικά, χημικά και βιολογικά συστήματα (Tusiime, 2022)

Τα συστήματα με στάδιο διαχωρισμού ενθαρρύνουν τη βιώσιμη διαχείριση του νερού, εστιάζοντας στην επαναχρησιμοποίηση και την περιβαλλοντική προστασία ενώ η συμβατική μέθοδος είναι πιο απλή αλλά συχνά λιγότερο αποτελεσματική, ειδικά σε περιοχές με αυξημένη πίεση για νερό.

Μια γνωστή διαδικασία διαχωρισμού και επεξεργασίας (Separation and On-site Treatment) του γκρίζου νερού περιλαμβάνει τη συλλογή του μέσω διπλού συστήματος σωληνώσεων, τον τοπικό καθαρισμό του σε μονάδα επεξεργασίας και την επί τόπου επαναχρησιμοποίησή του. Σε αντίθεση με τη μέθοδο του διαχωρισμού και η διπλή συλλογής (Separation & Dual Collection) μετά από την ξεχωριστή συλλογή των γκρίζων και των μαύρων νερών, οδηγούνται σε δευτεροβάθμια ή τριτοβάθμια επεξεργασίας. Με την συμβατική συλλογή και επεξεργασία (Conventional Collection & Treatment) τα αστικά λύματα συλλέγονται μέσω ενός μόνο συστήματος σωληνώσεων, μεταφέρονται μέσω αντλιοστασίων σε συμβατικές εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων. Τέλος, σε όλες τις μεθόδους τα επεξεργασμένα λύματα επαναχρησιμοποιούνται ή απορρίπτονται (Abdalla, et al., 2021).

## 2.7 Μαύρα Ύδατα

### 2.7.1 Χαρακτηριστικά από Διάφορες Πηγές

Τα γκρίζα ύδατα είναι λιγότερο μολυσμένα και μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν πιο εύκολα με κατάλληλη επεξεργασία σε σύγκριση με τα μαύρα ύδατα, τα οποία είναι πιο μολυσμένα με παθογόνους μικροοργανισμούς και οργανικά απόβλητα. Η επεξεργασία τους απαιτεί πολύ πιο σύνθετες διαδικασίες πριν από την ασφαλή διάθεση ή επαναχρησιμοποίηση.

Τα μαύρα ύδατα συνήθως αποτελούνται από λύματα από τουαλέτες και, σε ορισμένες περιπτώσεις, από νερό πλύσης πιάτων. Είναι κυρίως ένα μείγμα που περιέχει ανθρώπινα περιττώματα, ούρα και νερό από το καζανάκι (Jiabin Li, 2023). Χαρακτηρίζονται από υψηλή συγκέντρωση οργανικής ύλης και αιωρούμενων στερεών και μικρότερο όγκο σε σύγκριση με τα γκρίζα ύδατα.

Ο κύριος παράγοντας ρύπανσης είναι τα ανθρώπινα περιττώματα, τα οποία αποτελούνται κυρίως από νερό, υδατάνθρακες, πρωτεΐνες, λίπη, βακτηριακή βιομάζα και ανόργανη σύσταση. Η ανόργανη σύστασή τους περιλαμβάνει στοιχεία όπως ο φώσφορος (P), το κάλιο (K), το νάτριο (Na), το ασβέστιο (Ca), το χλώριο (Cl), ο σίδηρος (Fe) και το εύρος της υγρής μάζας των περιττωμάτων, κυμαίνεται μεταξύ 51 και 796 g/άτομο/ημέρα. Περίπου το 51% του COD, το 91% του αζώτου (N), το 78% του φωσφόρου (P) και οι περισσότεροι παθογόνοι μικροοργανισμοί στα οικιακά λύματα προέρχονται από το μαύρο νερό (Xu, 2023).

Ο πίνακας 12 συνοψίζει τα χαρακτηριστικά των μαύρων υδάτων στο χωριό Qiuxian του Πεκίνου. Πιο συγκεκριμένα, το μαύρο νερό συλλέχθηκε από δημόσια τουαλέτα στο Πεκίνο, και μετά από παραμονή 5 ημερών για διαχωρισμό σε στρώματα, το πιο καθαρό μέρος ορίστηκε ως ελαφρύ μαύρο νερό, ενώ το υπόλοιπο ως συμπυκνωμένο ασπρόμαυρο νερό. Τα LBW και CBW αποθηκεύτηκαν στους 4 °C μέχρι τη χρήση τους.

**Πίνακας 12** Χαρακτηριστικά διάφορων είδη νερού από διαφορετικές προελεύσεις (Wang, 2024).

Παράμετρος	Συμπυκνωμένα Μαύρα Ύδατα	Ελαφρά Μαύρα Ύδατα
Ολικά Στερεά (TS %)	1.52 ± 0.13	0.33 ± 0.03
Πτητικά Στερεά (VS %)	1.15 ± 0.06	0.20 ± 0.03
pH	7.24 ± 0.02	7.28 ± 0.01
Συνολικό COD (TCOD, mg/L)	8835.40 ± 623.50	6343.21 ± 553.20
Διαλυμένο COD (SCOD, mg/L)	3879.90 ± 144.80	4286.80 ± 128.90
Άζωτο(N %)	5.52	3.8
Άνθρακας (C %)	48.59	27.61
Υδρογόνο (H%)	6.36	3.35
Θείο (S,%)	0.81	1.54
C/N	8.8	7.26
Αμμωνιακό Άζωτο (NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N, mg/L)	1575 ± 13.33	1365 ± 16.67

C/N ratio: carbon/nitrogen

-: μη διαθέσιμα αποτελέσματα

Παρατηρείται ότι έχουν υψηλότερες τιμές στις περισσότερες στερεές παραμέτρους, όπως TS και VS, καθώς και στην περιεκτικότητα σε άνθρακα, τα συμπυκνωμένα μαύρα ύδατα παρουσιάζουν την υψηλότερη οργανική ρύπανση (TCOD και SCOD) και υψηλή συγκέντρωση αμμωνιακού αζώτου ενώ τα ελαφρά μαύρα ύδατα έχουν τη χαμηλότερη περιεκτικότητα σε στερεά και ανθρακούχες ενώσεις, αλλά υψηλότερη περιεκτικότητα σε θείο. Αποδεικνύεται ότι τα συμπυκνωμένα μαύρα ύδατα είναι η πιο ρυπογόνα κατηγορία με υψηλές συγκεντρώσεις οργανικών και ανόργανων ενώσεων. Τα ελαφρά μαύρα ύδατα έχουν χαμηλές συγκεντρώσεις οργανικών ρύπων και στερεών, καθιστώντας τα λιγότερο ρυπογόνα σε σύγκριση με τα υπόλοιπα δείγματα.

Οι κύριοι ρύποι που βρίσκονται στα μαύρα ύδατα είναι η οργανική ύλη, τα θρεπτικά συστατικά, τα βαρέα μέταλλα, τα έλαια και τα λίπη. Επίσης, μπορεί να έχουν υψηλές συγκεντρώσεις χημικής ζήτησης οξυγόνου (COD), αμμωνιακού αζώτου ( $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ) λόγω της παραμονής των ούρων, συνολικού φωσφόρου (TP) και συνολικού αζώτου (TN). Η μεγάλη ποσότητα οργανικής ύλης, καθώς και τα στοιχεία αζώτου (N) και φωσφόρου (P), μπορεί να οδηγήσει σε μείωση της συγκέντρωσης διαλυμένου οξυγόνου (DO) στο νερό, προκαλώντας την εμφάνιση μαύρης οσμής σε υδάτινα σώματα. Σύμφωνα με τους Wen Cangxiang, 2024 και Li Xiangyu, 2022, σημειώνεται ότι οι υψηλότερες συγκεντρώσεις εντοπίζονται στην CODt και CODs. Στον πίνακα 13 εμφανίζονται τα κυρία χαρακτηριστικά των μαύρων υδάτων που συλλέχθηκαν από τουαλέτες σε δύο διαφορετικές πόλεις της Κίνας.

**Πίνακας 13** Χαρακτηριστικά των μαύρων υδάτων που συλλέχθηκαν από τουαλέτες με διπλό καζανάκι.

Περιοχή	Zhicheng, Κίνα			Wenzhou, Κίνα			
	Μονάδα	Ελάχιστο	Μέγιστο	Μέσος Όρος	Ελάχιστο	Μέγιστο	Μέσος Όρος
CODt	mg/L	2445	5825	4334	-	-	-
CODsol	mg/L	609	2689	1523	-	-	-
CODs	mg/L	981	4474	2811	76	220	170
TN	mg/L	333	1188	774	104	151	128
$\text{NH}_4^+\text{-N}$	mg/L	163	703	463	60	93.1	80.2
TP	mg/L	34	105	58,14	15	22.7	18.7
PP	mg/L	21	70	4,212	-	-	-
SRP	mg/L	2	31	1,267	-	-	-
pH		8.00	9.09	860	6.06	7.75	7.11
Πηγή		(Wen Cangxiang, 2024)			(Li Xiangyu, 2022)		

- = μη διαθέσιμα αποτελέσματα

Η πόλη Zhicheng παρουσιάζει πολύ υψηλότερες τιμές στις περισσότερες παραμέτρους, ειδικά στον CODt και στον TN, γεγονός που υποδεικνύει σημαντικά υψηλότερη ρύπανση σε σύγκριση με τη Wenzhou. Η Zhicheng φαίνεται να αντιμετωπίζει σοβαρότερα προβλήματα ρύπανσης σε σύγκριση με τη Wenzhou, κάτι που αντικατοπτρίζεται στις υψηλότερες τιμές των περισσότερων

παραμέτρων. Οι διαφορές στις τιμές του pH υποδεικνύουν διαφορετικές χημικές συνθήκες στο νερό των δύο περιοχών.

Τα λύματα μαύρου νερού ενέχουν υψηλότερο κίνδυνο μόλυνσης και προκαλούν σημαντικότερους κινδύνους για την υγεία και το περιβάλλον σε σύγκριση με τα γκρίζα λύματα. Τα περισσότερα επιβλαβή βακτήρια στα οικιακά λύματα βρίσκονται στο μαύρο νερό, καθώς τα περιττώματα περιέχουν παθογόνους μικροοργανισμούς, όπως το E. coli, η σαλμονέλα, η σιγκέλα, οι εντεροϊοί και ο ιός της ηπατίτιδας Α, που συχνά ευθύνονται για τη μετάδοση διαφόρων ασθενειών και γενικά επηρεάζουν την περιβαλλοντική υγεία (Jiabini Li, 2023). Ο πίνακας 14 παρουσιάζει τη μέση χαρακτηριστική τιμή του μαύρου νερού για δείκτες μόλυνσης στην Δανία και στο Σαν Πάολο.

**Πίνακας 14** Μέση χαρακτηριστική τιμή του μαύρου νερού για δείκτες μόλυνσης.

Παράμετρος	Σαν Πάολο	Δανία
E. coli (CFU 100 mL <sup>-1</sup> )	$1.67 \times 10^7 \pm 1.24 \times 10^7$	$2 \times 10^4 - 2,4 \times 10^7$
Total Coliform (CFU 100 mL <sup>-1</sup> )	$1.46 \times 10^8 \pm 2.95 \times 10^7$	$1.1 \times 10^6 - 2.4 \times 10^7$
Πηγή	(Slompro, 2020)	(Jadhav N., 2024)

Από τον πίνακα 15 είναι εμφανές ότι το Σαν Πάολο έχει τις υψηλότερες συγκεντρώσεις και σε E. Coli αλλά και σε ολικά κολοβακτηρίδια που ξεπερνάνε τα επιτρεπτά όρια. Σε άλλες πηγές η E. Coli βρέθηκε σε συγκεντρώσεις  $10^8 \pm 10^9$  MPN/100 mL σε αποχετευτικές δεξαμενές,  $8 \times 10^9 \pm 9 \times 10^9$  MPN/100 mL σε βόθρους και  $9,83 \times 10^5 \pm 5.85 \times 10^5$  MPN/100 mL για μαύρα νερά από οικισμούς. Παράλληλα σε ολικά κολοβακτηρίδια βρέθηκαν  $3 \times 10^9 \pm 5 \times 10^9$  MPN/100 mL σε βόθρους (Jiabini Li, 2023). Υπογραμμίζονται οι διαφορές στις συγκεντρώσεις των E. coli και Total Coliform ανάλογα με την πηγή των μαύρων νερών. Οι βόθροι και οι αποχετευτικές δεξαμενές παρουσιάζουν τις υψηλότερες συγκεντρώσεις, γεγονός που υποδηλώνει έντονη κοπρανούς μόλυνση. Τα οικιακά μαύρα νερά και τα μαύρα νερά από τουαλέτα κενού αέρος (όπως στη Δανία) έχουν σχετικά χαμηλότερες συγκεντρώσεις, πιθανότατα λόγω της μείωσης της κοπρανούς ύλης και της χρήσης λιγότερης ποσότητας νερού.

### 2.7.2 Επεξεργασία

Οι βασικοί στόχοι της επεξεργασίας του μαύρου νερού περιλαμβάνουν την αποτελεσματική απομάκρυνση οργανικών και μικροβιολογικών ρύπων, με σκοπό την προστασία της δημόσιας υγείας και του περιβάλλοντος, καθώς και τη μείωση του φορτίου θρεπτικών ουσιών. Επιπλέον, επιδιώκεται η μείωση των καθορισμένων παραμέτρων ποιότητας, συμπεριλαμβανομένων της οργανικής ρύπανσης (BOD, COD), των μικροβιολογικών ρύπων, των θρεπτικών συστατικών, των αιωρούμενων σωματιδίων και των βαρέων μετάλλων. Το μαύρο νερό συνήθως επεξεργάζεται μέσω μιας μεθόδου συνδυασμένης συλλογής-επεξεργασίας, η οποία αυξάνει τον φόρτο εργασίας των εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων. Στις αστικές περιοχές, το μαύρο νερό συχνά διαχειρίζεται σε σηπτικούς βόθρους, ενώ το υγρό απόβλητο μεταφέρεται συλλογικά σε δημοτικά εργοστάσια επεξεργασίας λυμάτων για περαιτέρω επεξεργασία. Στις βιολογικές

μεθόδους, και ειδικότερα στην αναερόβια επεξεργασία, ο σηπτικός βόθρος προσφέρει έναν απλό και αποδοτικό τρόπο για την επεξεργασία των ρύπων μέσω καθίζησης και αναερόβιας χώνευσης. Στις αγροτικές περιοχές, το επεξεργασμένο νερό διοχετεύεται απευθείας σε φυσικά υδάτινα σώματα ή επιστρέφει στα χωράφια, γεγονός που συχνά συμβάλλει σημαντικά στον ευτροφισμό των υδάτων κατάντη (Χυ, 2023).

Αρχικά γίνεται διαχωρισμός υγρών και στερεών μέσω φίλτρου ακολουθώντας η καθίζηση και ο διαχωρισμός με δίνη (Jadhav N., 2024). Η επεξεργασία του μαύρου νερού με λύματα μπορεί να ακολουθήσει δύο κύριες προσεγγίσεις: την κεντρική επεξεργασία (centralized), η οποία είναι ακριβή και δύσκολη στην εφαρμογή σε αγροτικές περιοχές, και την τοπική επεξεργασία (on-site), η οποία θεωρείται πιο υποσχόμενη. Η τοπική επεξεργασία χρησιμοποιεί τεχνολογίες όπως η αναερόβια χώνευση (anaerobic digestion), τα ηλεκτροχημικά υβριδικά συστήματα και τα τεχνητούς υδροβιότοπους, αλλά καμία από αυτές τις μεθόδους δεν έχει επιτύχει την ανάκτηση θρεπτικών ουσιών τους. Μια υποσχόμενη εναλλακτική είναι η χρήση συγκροτημάτων μικροαλγών-βακτηρίων (microalgal-bacterial consortium), που προσφέρουν αρκετά πλεονεκτήματα, όπως η ανάκτηση θρεπτικών ουσιών, οι χαμηλές απαιτήσεις αερισμού, η μείωση των αερίων θερμοκηπίου και η παραγωγή πολύτιμης βιομάζας (Li, et al., 2024).

### 3. Λύσεις Βασισμένες στη φύση (Nature-Based Solutions)

#### 3.1 Εισαγωγή

Τα NBS ή Λύσεις που Βασίζονται στη Φύση είναι δράσεις που αποσκοπούν στην προστασία, τη βιώσιμη διαχείριση και την αποκατάσταση φυσικών και τροποποιημένων οικοσυστημάτων, με τρόπους που αντιμετωπίζουν αποτελεσματικά και προσαρμοστικά κοινωνικές προκλήσεις, προσφέροντας παράλληλα οφέλη για την ανθρώπινη ευημερία και τη βιοποικιλότητα.

Η συμβολή τους στην κάλυψη κοινωνικών αναγκών είναι καλά τεκμηριωμένη. Ενδεικτικά, η προστασία των υδρολογικών λεκανών μπορεί να αποφέρει οικονομικά οφέλη στις τοπικές κοινότητες, καθώς και να ενισχύσει την υγεία και την ποιότητα ζωής των κατοίκων των περιοχών που εξαρτώνται από αυτούς τους φυσικούς πόρους.

Από την αποκατάσταση υποβαθμισμένων εδαφών και παράκτιων ζωνών, έως τη συμπληρωματική λειτουργία με συμβατικές υποδομές, όπως φράγματα και αναχώματα, έχει πλέον καταστεί σαφές ότι η φύση διαδραματίζει καίριο ρόλο στην κάλυψη θεμελιωδών κοινωνικών αναγκών, προσφέροντας παράλληλα κλιματική ανθεκτικότητα και πολλαπλά οφέλη (IUCN, 2020).

Τα NBS παρουσιάζουν σημαντικά πλεονεκτήματα έναντι άλλων στρατηγικών προσαρμογής στην κλιματική αλλαγή, όπως οι γκρι υποδομές ιδιαίτερα όσον αφορά τη μείωση των κλιματικών κινδύνων. Τα NBS αποδεικνύονται πιο αποτελεσματικά στη μετρίαση των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής, με τη μεγαλύτερη απόδοση να καταγράφεται στην αντιμετώπιση πλημμυρικών φαινομένων. Ακολουθούν, σε επίπεδο αποτελεσματικότητας, η μείωση της απορροής, η βελτίωση της ποιότητας του νερού, η απομείωση της αιχμής ροής, η μείωση της θερμοκρασίας και η ενίσχυση της θερμικής άνεσης. Αντιθέτως, οι γκρι υποδομές έχουν συσχετιστεί με αύξηση της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος (Prado, et al., 2024).

Σε συγκριτικό επίπεδο, τα NBS αποδεικνύονται σχεδόν διπλάσια πιο αποτελεσματικά από τις γκρι υποδομές (18,6% έναντι 8,1%). Ο συνδυασμός των NBS με άλλες στρατηγικές, όπως οι γκρι υποδομές, ενισχύει τη συνολική λειτουργικότητα των παρεμβάσεων και δημιουργεί συνέργειες στην αντιμετώπιση ποικίλων κλιματικών κινδύνων.

Ωστόσο, η αποτελεσματικότητα των NBS φαίνεται να μειώνεται σε τροπικές και άνυδρες περιοχές, γεγονός που υποδεικνύει την ανάγκη για στοχευμένες και πολυδιάστατες παρεμβάσεις. Ειδικές εφαρμογές, όπως οι κήποι βροχής, έχουν αναδειχθεί ως ιδιαίτερα αποτελεσματικές στην πρόληψη πλημμυρών και στη βελτίωση της θερμικής άνεσης, ενώ τα υδάτινα στοιχεία συμβάλλουν ουσιαστικά στη μείωση της θερμοκρασίας μέσω της εξάτμισης.

Η ανάπτυξη μικτών και προσαρμοσμένων στρατηγικών NBS είναι καθοριστικής σημασίας για την αποτελεσματική διαχείριση των πολλαπλών κλιματικών κινδύνων, καθώς και για τη μεγιστοποίηση των οικοσυστημικών και κοινωνικών οφελών. Η ενσωμάτωσή τους σε ευρύτερες στρατηγικές, που περιλαμβάνουν και τεχνολογικά μέσα και υποδομές, συνιστά μια ολιστική προσέγγιση για την ενίσχυση της ανθεκτικότητας των πόλεων απέναντι στην κλιματική αλλαγή (Prado, et al., 2024).

Για την ενίσχυση της βιοποικιλότητας, την αισθητική αναβάθμιση του αστικού και περιαστικού περιβάλλοντος, καθώς και την κάλυψη των αυξανόμενων ανθρώπινων αναγκών, έχουν αναπτυχθεί διάφορα μοντέλα NBS, τα οποία διαφέρουν ως προς τα χαρακτηριστικά, την έκταση και τις λειτουργίες τους. Τα μοντέλα αυτά έχουν σχεδιαστεί ώστε να ανταποκρίνονται στις απαιτήσεις επεξεργασίας διαφορετικών τύπων υδάτων.

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται ορισμένοι από τους πιο διαδεδομένους και τεκμηριωμένους τύπους NBS, βάσει της ταξινόμησης και της ανάλυσης των Langergraber, et al., 2021. Επιλέχθηκαν λύσεις που έχουν μελετηθεί εκτενώς, έχουν αξιολογηθεί μέσω πλήθους ερευνητικών εργασιών και συνοδεύονται από επαρκή ποσοτικά και ποιοτικά δεδομένα.

Η ανάλυση επικεντρώνεται στα βασικά χαρακτηριστικά κάθε συστήματος, στις μεθόδους επεξεργασίας νερού που εφαρμόζονται, στην αποδοτικότητα των παρεμβάσεων, καθώς και στα είδη υδάτων για τα οποία είναι κατάλληλες. Συγκεκριμένα, εξετάζονται τα εξής συστήματα: πράσινες στέγες, συστήματα συλλογής όμβριων υδάτων, πράσινοι τοίχοι, τεχνητοί υγροβιότοποι, συστήματα βιοκατακράτησης και κήποι βροχής (Langergraber, et al., 2021).

## 3.2 Πράσινες στέγες / Green roofs

### 3.2.1 Χαρακτηριστικά

Οι πράσινες στέγες (green roofs), γνωστές επίσης ως living roofs, οικοστέγες (eco-roofs) ή φυτοσκεπές (vegetated roofs), θεωρούνται ελκυστικά και ανερχόμενα τεχνητά οικοσυστήματα για τη διαχείριση της απορροής από τις αστικές στέγες. Χρησιμοποιούνται ως μια από τις πιο κοινές εφαρμογές πράσινων υποδομών στις πόλεις, είναι αντικείμενο πολλών επιστημονικών μελετών, παρουσιάζουν υψηλό δυναμικό για βελτίωση του μικροκλίματος και αποκατάσταση του φυσικού υδρολογικού κύκλου.

Προσφέρουν πολυάριθμα περιβαλλοντικά οφέλη, όπως διαχείριση όμβριων και βρόχινων υδάτων, μείωση θορύβου, ενεργειακή απόδοση και καθαρισμό του αέρα μειώνοντας τις συγκεντρώσεις αιωρούμενων σωματιδίων (PM), όζοντος (O<sub>3</sub>), οξειδίων του αζώτου (NO<sub>x</sub>) και διοξειδίου του θείου (SO<sub>2</sub>) (Basanta Kumar Biswal, 2022). Σε αστική κλίμακα, συμβάλλουν στη βελτίωση της ποιότητας ζωής στις πόλεις, όπως η βελτίωση της ποιότητας του αέρα, η απορρόφηση του αστικού θορύβου, η μείωση του φαινομένου της αστικής θερμικής νησίδας και η ενίσχυση της βιοποικιλότητας (Almeida, 2023). Οι πράσινες στέγες είναι πιο αποτελεσματικές κατά τη διάρκεια συχνών καταιγίδων μικρής έντασης και μπορούν επίσης να προσφέρουν διάφορες οικοσυστημικές υπηρεσίες, όπως βιολογικά καταφύγια για μικροοργανισμούς και πτηνά (Basanta Kumar Biswal, 2022).

Οι πράσινες στέγες, ως ημι-φυσικά συστήματα, επηρεάζονται από τα χαρακτηριστικά των υλικών τους και αλληλοεπιδρούν με το περιβάλλον και επηρεάζονται από περιβαλλοντικούς παράγοντες όπως η θερμοκρασία, η ηλιακή ακτινοβολία και η ταχύτητα του ανέμου. Συνήθως, τα συστήματα με παχύτερα υποστρώματα και μεγαλύτερη χωρητικότητα νερού να είναι πιο σταθερά και λιγότερο επηρεασμένα από εξωτερικές μεταβολές (Göbner, 2025).

Οι κλιματικές συνθήκες επηρεάζουν την απόδοση των πράσινων στεγών (Green Roofs, GR) σε πολλούς τομείς, κυρίως αλλάζοντας την υδρολογική απόδοση του συστήματος. Οι κλιματικές συνθήκες επηρεάζουν τα ποσοστά εξατμισοδιαπνοής, τις περιόδους ξηρού καιρού πριν από βροχοπτώσεις, καθώς και την ένταση και το βάθος των βροχοπτώσεων. Πολλές μελέτες σε διαφορετικές κλιματικές συνθήκες δείχνουν ότι η κατακράτηση μειώνεται καθώς αυξάνεται το βάθος της βροχόπτωσης. Από την άλλη, μικρές βροχοπτώσεις τείνουν να κατακρατούνται πλήρως στα στρώματα των πράσινων στεγών, ακόμα και σε εκτεταμένες λύσεις πράσινων στεγών (Almeida, 2023).

Τα βασικά στοιχεία μιας πράσινης στέγης περιλαμβάνουν τη βλάστηση, το υπόστρωμα ανάπτυξης, το στρώμα φίλτραρίσματος, το στρώμα αποστράγγισης, τη στεγανοποίηση και το φράγμα ριζών. Ανάλογα με το βάθος του υποστρώματος, οι φυτεμένες στέγες κατηγοριοποιούνται σε εκτατικού τύπου (extensive green roof), οικοστέγες (eco-roofs) και εντατικού τύπου (intensive green roof). Ειδικότερα, οι φυτοσκεπές (vegetated roofs), σχεδιάζονται συχνά για να μειώνουν την ποσότητα απορροής που καταλήγει στο αποχετευτικό σύστημα, συγκρατώντας το βρόχινο νερό στις αδιαπέραστες επιφάνειες της στέγης γεμάτες με

πορώδες έδαφος και μέσω της εξατμισοδιαπνοής από τη βλάστηση (Basanta Kumar Biswal, 2022).

Οι πράσινες στέγες αποτελούν ένα φυσικό σύστημα που προσφέρει πολλές οικοσυστημικές υπηρεσίες που μπορούν να βελτιώσουν την ευημερία σε πυκνοκατοικημένες αστικές περιοχές. Οι εκτεταμένες πράσινες στέγες (extensive green roofs - EGR) είναι συστήματα με ρηχό υπόστρωμα και φυτά που απαιτούν ελάχιστη συντήρηση, γι' αυτό και θεωρούνται οικονομικά αποδοτικά και κατάλληλα για ευρεία χρήση στις πόλεις. Ωστόσο, η επιθυμία για ακόμη χαμηλότερη συντήρηση μπορεί να συγκρουστεί με τις ανάγκες των φυτών, καθώς η μειωμένη άρδευση μπορεί να επηρεάσει αρνητικά τη φυτική ποικιλότητα, την επιβίωση και την κάλυψη των φυτών (Liao, et al., 2025).

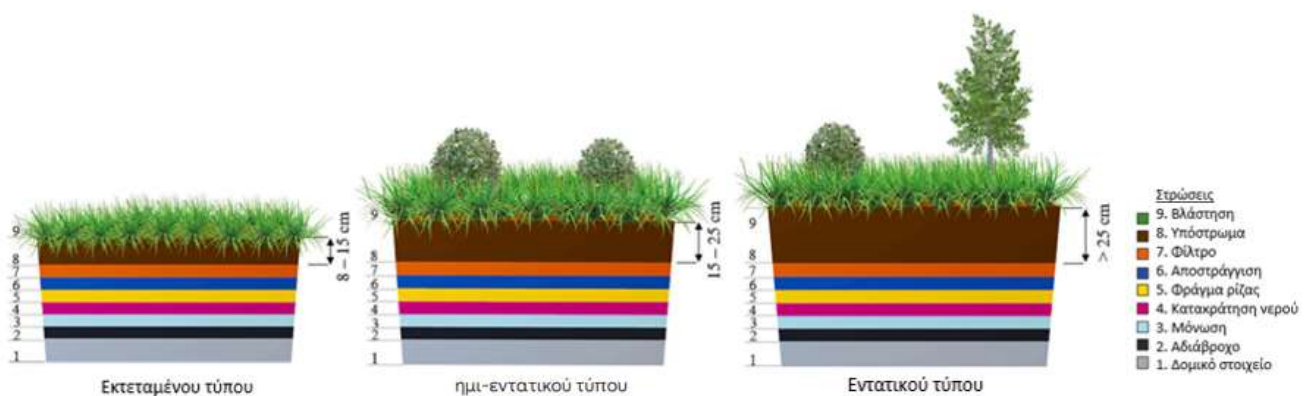


**Εικόνα 1** Πράσινες στέγες σε κτίρια κατοικιών (1,2), θεσμικά κτίρια (3,4), εμπορικά κτίρια (5,6) (Shafique, et al., 2018)

Το εκτεταμένο πράσινο δώμα αναφέρεται σε βασικά, ελαφριά, φυτεμένα συστήματα που εφαρμόζονται στην οροφή ενός κτηρίου και συνήθως αποτελούνται από βότανα, λειχήνες και γρασίδι. Η εγκατάσταση και η συντήρηση είναι λιγότερο δαπανηρές σε σύγκριση με τα εντατικά συστήματα. Το υπόστρωμα είναι σχετικά λεπτότερο (10–15 cm ή σε μειωμένη μορφή >10 cm) από ό,τι στα εντατικά συστήματα (περισσότερα από 20 cm). Οι εκτεταμένες κατασκευές έχουν βάθος εδάφους μικρότερο από 15–20 cm, ενώ οι εντατικές λύσεις διαθέτουν παχύτερο

στρώμα. Οι εκτεταμένες πράσινες στέγες προτιμώνται συνήθως, καθώς είναι γενικά πιο οικονομικές, ευκολότερες στην εγκατάσταση και διαθέτουν ελαφρύτερο εδαφικό υπόστρωμα. Το πάχος του εδάφους περιορίζει το μήκος των ριζών και, κατά συνέπεια, τον τύπο της βλάστησης που μπορεί να εγκατασταθεί (Cristiano, et al., 2021) Αντιθέτως, ένα εντατικό πράσινο δώμα περιλαμβάνει βλάστηση με μεγαλύτερη ποικιλία από το εκτεταμένο πράσινο δώμα, που εγκαθίσταται στις οροφές, κανονικά προσβάσιμο για το κοινό ή για δραστηριότητες αναψυχής, κηπουρικής, χαλάρωσης και κοινωνικοποίησης. Είναι συνήθως πιο βαριές κατασκευαστικά και απαιτούν μεγαλύτερη προσπάθεια για την εγκατάσταση και τη συντήρησή τους, όπως τακτικό πότισμα και λίπανση. Ωστόσο, προσφέρουν περισσότερους βιότοπους και συμβάλλουν στην ενίσχυση της βιοποικιλότητας.

Ένα ημι-εντατικό πράσινο δώμα αποτελεί συνδυασμό περιοχών τόσο εκτεταμένων όσο και εντατικών πράσινων δωματίων. Εφαρμόζεται στις οροφές και χαρακτηρίζεται από μικρά ποώδη φυτά, φυτά εδαφοκάλυψης, γρασίδια, πολυετή φυτά και μικρούς θάμνους, καθώς και μεγαλύτερα φυτά, απαιτώντας μέτρια συντήρηση. Το συνιστώμενο ελάχιστο πάχος υποστρώματος είναι μεταξύ 12 cm και 20 cm, αλλά μπορεί να προσαρμοστεί. Αυτός ο τύπος πράσινου δώματος απαιτεί περισσότερη συντήρηση από τα εκτεταμένα συστήματα και έχει τη δυνατότητα να φιλοξενήσει πλουσιότερη οικολογία (Langergraber, et al., 2021). Στην παρακάτω εικόνα 2 απεικονίζονται τα συνήθη στρώματα για κάθε κατηγορία.



**Εικόνα 2** Στρώματα που χρησιμοποιούνται συχνά για κάθε τύπο πράσινης στέγης: εκτεταμένα, ημι-εντατικά και εντατικά. Προσαρμογή εικόνας από (Fiorentin, et al., 2024).

Οι πολυστρωματικές πράσινες στέγες, που ονομάζονται επίσης μπλε-πράσινες στέγες, είναι καινοτόμα συστήματα που συνδυάζουν την τεχνολογία των πράσινων στεγών με ένα σύστημα συλλογής όμβριων υδάτων. Οι πολυστρωματικές πράσινες στέγες περιλαμβάνουν όλα τα χαρακτηριστικά στοιχεία μιας πράσινης στέγης: φυτική κάλυψη, στρώμα εδάφους, γεωμεμβράνη φιλτραρίσματος, στρώμα αποστράγγισης και προστατευτική μεμβράνη στεγανοποίησης για την προστασία του κτιρίου. Σε σύγκριση με τις παραδοσιακές πράσινες στέγες, οι πολυστρωματικές διαθέτουν μια επιπλέον στρώση – μια δεξαμενή νερού, η οποία επιτρέπει τη συλλογή και αποθήκευση του νερού της βροχής που διαπερνά το στρώμα του εδάφους. Το συλλεγόμενο νερό μπορεί να χρησιμοποιηθεί για διάφορους σκοπούς, όπως για την άρδευση της ίδιας της πράσινης στέγης. Μια βαλβίδα μπορεί να εγκατασταθεί για τη ρύθμιση της στάθμης του νερού στη δεξαμενή. Σε σύγκριση με τις παραδοσιακές πράσινες

στέγες, οι πολυστρωματικές μπορούν να δημιουργήσουν το κατάλληλο περιβάλλον για μια ευρύτερη ποικιλία φυτών, χάρη στο αποθηκευμένο νερό που μπορεί εύκολα να χρησιμοποιηθεί για άρδευση (Cristiano, et al., 2021).

### 3.2.2 Επεξεργασία

Η βροχόπτωση σε αστικές περιοχές είναι συνήθως πιο προβληματική από ό,τι σε αγροτικές περιοχές, λόγω των αδιαπέρατων επιφανειών οι οποίες συλλέγουν τη ροή του νερού και τη διοχετεύουν στο αστικό αποχετευτικό σύστημα, προκαλώντας γρήγορη απορροή και υψηλότερες αιχμές ροής. Οι πράσινες στέγες μειώνουν την απορροή του βρόχινου νερού και, συνεπώς, μετριάζουν αυτό το πρόβλημα (Alar Teemusk, 2007). Για εκτεταμένες πράσινες στέγες, η μέση μείωση της απορροής όμβριων υδάτων κυμαίνεται από 33% έως 81%. Στις εντατικές πράσινες στέγες, αυτό το ποσοστό είναι περίπου 22% υψηλότερο σε σύγκριση με τις εκτεταμένες. Όπως αναμενόταν, οι εκτεταμένες πράσινες στέγες έχουν μικρότερη ικανότητα αποθήκευσης βρόχινου νερού σε σύγκριση με τις εντατικές, κυρίως λόγω του πάχους του υποστρώματος (Almeida, 2023). Η μείωση επιτυγχάνεται μέσω της καθυστέρησης της έναρξης της απορροής, χάρη στην απορρόφηση του νερού από την πράσινη στέγη, της μείωσης της συνολικής απορροής μέσω της συγκράτησης μέρους του βρόχινου νερού, και της κατανομής της απορροής σε μεγαλύτερο χρονικό διάστημα, μέσω μιας σχετικά αργής απελευθέρωσης του πλεονάζοντος νερού που αποθηκεύεται στο στρώμα του υποστρώματος. Η ποσότητα του νερού που συγκρατείται εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως ο όγκος και η ένταση της βροχόπτωσης, ο χρόνος που έχει παρέλθει από την προηγούμενη βροχόπτωση, το βάθος και η κλίμακα διαβροχής του υποστρώματος, καθώς και η κλίση της στέγης. Μια πράσινη στέγη μπορεί να συγκρατήσει περισσότερο βρόχινο νερό σε θερμό καιρό απ' ό,τι σε ψυχρό καιρό. Πολλές έρευνες έχουν δείξει ότι το στρώμα του υποστρώματος μιας πράσινης στέγης θα κορεστεί πλήρως από βρόχινο νερό, εάν οι βροχοπτώσεις ακολουθήσουν πολύ σύντομα η μία την άλλη, και κατά συνέπεια η πράσινη στέγη δεν μπορεί να καθυστερήσει την απορροή μιας έντονης βροχόπτωσης (Alar Teemusk, 2007).

Το ελαφρύ γκρίζο νερό παράγεται σε σημαντικές ποσότητες (45–60% των οικιακών λύματα) και περιέχει χαμηλό ρυπαντικό φορτίο σε σύγκριση με μικτά οικιακά λύματα (Noutsopoulos., et al., 2018). Η μελέτη (V. Thomaidi, 2022) διεξάγεται σε μια ταράτσα στη Μυτιλήνη, στην Ελλάδα το χρονικό διάστημα 2020 με 2021, εξετάζει την επίδραση του υποστρώματος, του βάθους του υποστρώματος, τα είδη των φυτών και την απόδοση στην απομάκρυνση ρύπων από πράσινες στέγες που επεξεργάζονται γκρίζο νερό. Το βάθος του υποστρώματος αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για την επεξεργασία γκρίζων νερών με όσο μεγαλύτερο το βάθος του υποστρώματος τόσο μεγαλύτερη η αποδοτικότητα απομάκρυνσης οργανικών ρύπων. Στο πείραμα πέτυχε απομάκρυνση >90% της COD, των TSS και της θολότητας. Παρατηρήθηκε ότι η βλάστηση είχε σημαντική επίδραση στην απομάκρυνση του συνολικού αζώτου (TN) και η εφαρμογή ανακυκλοφορία με αναλογία 40% κατά τις τελευταίες 30 ημέρες του πειράματος βελτίωσε σημαντικά τα χαρακτηριστικά του επεξεργασμένου νερού, αυξάνοντας την απομάκρυνση των BOD, TN και της θολότητας. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η βλάστηση και η επανακυκλοφορία μπορούν να βελτιώσουν την απομάκρυνση οργανικών υλών, αζώτου και αιωρούμενων στερεών.

Ένα καινοτόμο σύστημα όπως το σύστημα ανακύκλωσης νερού πράσινης στέγης (green roof water recycling system GROW) για την επεξεργασία οικιακών γκρίζων νερών χαμηλής οργανικής ισχύος προς επαναχρησιμοποίηση μελετήθηκε και φυτεύτηκε μια ποικιλία υδροχαρών φυτών, επιλεγμένων τόσο για τις ικανότητές τους στην επεξεργασία του νερού όσο και για τα αισθητικά τους χαρακτηριστικά. Το σύστημα GROW έχει σχεδιαστεί για να τοποθετείται σε κεκλιμένες στέγες, καθιστώντας το κατάλληλο για νέες αστικές αναπτύξεις όπου ο διαθέσιμος χώρος στο έδαφος είναι περιορισμένος. Ωστόσο, με τη χρήση ξύλινου πλαισίου, μπορεί να εγκατασταθεί και σε επίπεδη στέγη ή στο έδαφος. Η δοκιμαστική εγκατάσταση αποτελούνταν από πέντε σειρές φυτών με δύο συνδεδεμένες μεταξύ τους δεξαμενές, τοποθετημένες σε βαθμιδωτό ξύλινο πλαίσιο, προσομοιώνοντας έτσι μια κεκλιμένη στέγη. Ο πίνακας 15 παρουσιάζει τις συγκεντρώσεις των παραμέτρων του γκρίζου νερού πριν και μετά την επεξεργασία με το σύστημα GROW, καθώς και την αποτελεσματικότητα της απομάκρυνσής τους.

**Πίνακας 15** Μέσα χαρακτηριστικά εισροής και εκροής για το γκρίζο νερό (Avery, 2007).

Παράμετρος	Επεξεργασία	Μέσος Όρος	Αποτελεσματικότητα αφαίρεσης
BOD (mg/L)	Εισροή	19.1±1.0	-
	GROW	1.6±0.2	91.5%
COD (mg/L)	Εισροή	80.9±3.6	-
	GROW	16.2±2.9	80.0%
Θολότητα (NTU)	Εισροή	17.4±1.6	-
	GROW	0.3±0.0	98.2%
SS (mg/L)	Εισροή	23.1±3.5	-
	GROW	2.0±0.5	91.2%
pH	Εισροή	7.3±0.0	-
	GROW	7.3±0.0	-
Total coliforms (log <sub>10</sub> CFU/100cm <sup>3</sup> )	Εισροή	5.7±0.1	-
	GROW	1.5±0.1	4.2
<i>E. coli</i> (log <sub>10</sub> (γ+1) CFU/100)	Εισροή	2.9±0.1	-
	GROW	0.2±0.1	2.6
Εντερόκοκκο (log <sub>10</sub> CFU/100 cm <sup>3</sup> )	Εισροή	3.1±0.2	-
	GROW	0.5±0.1	2.6
Νιτρικό άλας (mg/L)	Εισροή	1.5±0.2	-
	GROW	1.9±0.2	-25.2%
Αμμωνία (mg/L)	Εισροή	1.3±0.4	-
	GROW	0.7±0.3	48.8%
Φωσφορικό άλας (mg/L)	Εισροή	0.7±0.1	-
	GROW	0.8±0.1	-15.1%
Πηγή		(Avery, 2007)	

Οι μικροβιακοί δείκτες υπολογίστηκαν ως μείωση καταγραφής.

Η υψηλότερη απόδοση απομάκρυνσης παρατηρείται στην θολότητα, που υποδηλώνει σημαντική βελτίωση στη διαύγεια του νερού. Παρόμοια υψηλή απόδοση εμφανίζεται και στα αιωρούμενα στερεά (91,2%), καθώς και στο BOD (91,5%), υποδεικνύοντας αποτελεσματική αποδόμηση της οργανικής ύλης και της απομάκρυνσης των μικροβιακών δεικτών. Επιπλέον, η μείωση των νιτρικών αλάτων (-25,2%) και η αύξηση των φωσφορικών αλάτων (-15,1%) δείχνουν ότι το σύστημα δεν απομακρύνει αποτελεσματικά τα συγκεκριμένα θρεπτικά στοιχεία, κάτι που μπορεί να οδηγήσει σε δευτερογενή προβλήματα, όπως ο ευτροφισμός σε περίπτωση επαναχρησιμοποίησης του νερού σε υδάτινα σώματα. Συνολικά, το σύστημα GROW είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικό στη μείωση των οργανικών ρύπων και της θολότητας, αλλά παρουσιάζει αδυναμίες στην απομάκρυνση παθογόνων και θρεπτικών στοιχείων, κάτι που θα μπορούσε να βελτιωθεί με επιπλέον στάδια επεξεργασίας, όπως απολύμανση και προχωρημένες μέθοδοι απονιτροποίησης.

### 3.3 Συστήματα συλλογής όμβριων υδάτων / Rainwater Harvesting Systems

#### 3.3.1 Χαρακτηριστικά

Τα συστήματα συλλογής βρόχινου νερού (Rainwater Harvesting Systems - RWHS)) περιλαμβάνουν τη συγκέντρωση, συλλογή, αποθήκευση και επεξεργασία βρόχινου νερού από στέγες, ταράτσες, αυλές και άλλες μή διαπερατές επιφάνειες και συμβάλλουν στη μείωση του όγκου των όμβριων υδάτων που απορρέουν στο αποχετευτικό σύστημα, μειώνοντας τον κίνδυνο πλημμυρών, ενώ παράλληλα καλύπτουν τις ανάγκες μη πόσιμου νερού μέσω της επαναχρησιμοποίησης του βρόχινου νερού (Langergraber, et al., 2021). Τα RWHS προσφέρουν μια εναλλακτική πηγή νερού που συμβάλλει στη μείωση της πίεσης στους υδατικούς πόρους και, κατά συνέπεια, στη μείωση του οικολογικού αποτυπώματος που συνδέεται με τη χρήση πόσιμου νερού. Σε αυτό το πλαίσιο, τα μεγάλα κτίρια, όπως τα δημόσια, πανεπιστημιακά ή εργοστασιακά κτίρια, διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στο αστικό περιβάλλον. Καθώς αυτά τα κτίρια είναι μεγάλοι καταναλωτές φυσικών πόρων, όπως το νερό, οι μεγάλες επιφάνειές τους μπορούν να συμβάλλουν σημαντικά στη μείωση του όγκου των όμβριων υδάτων που απορρίπτονται στα συστήματα αποχέτευσης, μετριάζοντας έτσι ένα από τα συχνότερα περιβαλλοντικά προβλήματα στις πόλεις, τις πλημμύρες (Almeida, 2023). Τονίζεται ότι τα συστήματα συλλογής όμβριων υδάτων (RWHS) υπό συνθήκες ημι-άνυδρου κλίματος παρουσιάζουν μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα στη συλλογή όμβριων υδάτων σε σύγκριση με περιοχές με υγρό κλίμα. Ωστόσο, μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα εξοικονόμησης νερού και αξιοπιστία επιτυγχάνονται σε υγρές περιοχές όταν η χωρητικότητα αποθήκευσης των δεξαμενών είναι μεγάλη και η ζήτηση νερού χαμηλή.

Από μια ερευνά που έγινε για κατοικίες στο Ιράν, υπό τρεις διαφορετικές κλιματικές συνθήκες, τα ευρήματα δείχνουν ότι σε υγρά κλίματα, η αξιοπιστία των RWHS φτάνει έως και το 70% του χρόνου για μεγαλύτερες επιφάνειες συλλογής (έως 240 τ.μ.). Η αξιοπιστία του συστήματος μειώνεται στο 40% υπό μεσογειακές κλιματικές συνθήκες για την ίδια διαμόρφωση RWHS. Αντίστοιχα, αξιολογήθηκε η απόδοση των RWHS σε 46 περιοχές υπό πέντε διαφορετικές κλιματικές ζώνες της Ευρώπης και διαπιστώθηκε ότι τα ψυχρά υγρά εύκρατα κλίματα παρουσιάζουν τις υψηλότερες τιμές συνολικής εξοικονόμησης και αποτελεσματικότητας νερού. Επιπλέον, τονίζεται ότι η συμπεριφορά του συστήματος επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από την προηγούμενη ξηρή περίοδο, ενώ τα χαρακτηριστικά των βροχοπτώσεων, όπως το βάθος, η ένταση και η διάρκεια, παρουσιάζουν ασθενείς συσχετίσεις με την απόδοση του συστήματος. Επομένως, τα κύρια συμπέρασμα, είναι ότι η απόδοση των RWHS, η οποία περιλαμβάνει την αποτελεσματικότητα εξοικονόμησης νερού και την αποδοτικότητα συλλογής όμβριων υδάτων, επηρεάζεται σημαντικά από τις τοπικές κλιματικές συνθήκες (Almeida, 2023).

### 3.3.2 Επεξεργασία

Η συλλογή όμβριων υδάτων από στέγες (Rooftop Rainwater Harvesting -RTRWH) αποτελεί μια δραστική μέθοδο διαχείρισης υδάτινων πόρων, η οποία περιλαμβάνει τη μεταφορά και αποθήκευση του νερού μέσω συστήματος σωληνώσεων και δεξαμενών. Κατά την πρώτη βροχόπτωση, εφαρμόζεται διαδικασία απομάκρυνσης του αρχικού όγκου νερού για την αποφυγή επιμόλυνσης, ενώ ορισμένα συστήματα ενσωματώνουν φίλτρα (π.χ. άμμου, χαλκιού) για την ενίσχυση της ποιότητας του συλλεγόμενου νερού. Παρά τη ραγδαία εξάπλωση της μεθόδου, η ακριβής εκτίμηση του απαιτούμενου όγκου δεξαμενής αποτελεί μια ιδιαίτερη πρόκληση στον σχεδιασμό των συστημάτων RTRWH.

Όσον αφορά την επεξεργασία του συλλεγμένου νερού, εφαρμόζονται τόσο μέτρα πριν από την αποθήκευση όσο και μετά. Η εκτροπή της πρώτης ροής (first flush) θεωρείται ιδιαίτερα αποτελεσματική, καθώς απομακρύνει ρύπους όπως ιζήματα, οργανικές ενώσεις και φυτοφάρμακα, ενώ μειώνει προβλήματα οσμής και αισθητικής. Η καθίζηση και η προσρόφηση βελτιώνουν περαιτέρω την ποιότητα του νερού. Επιπλέον, φίλτρα βαρύτητας αυτοκαθαριζόμενα και μηχανικά χρησιμοποιούνται ευρέως για την απομάκρυνση αιωρούμενων στερεών.

Η μετεπεξεργασία περιλαμβάνει συχνά φίλτρα άμμου, φίλτρα ιζημάτων σε αντλίες, καθώς και απολύμανση με μέσα όπως υπεριώδη ακτινοβολία, όζον, ιώδιο, χλώριο και υπερμαγγανικό κάλιο. Σε ορισμένες περιπτώσεις χρησιμοποιούνται επίσης θρομβωτικά μέσα όπως υδροξείδιο του ασβεστίου και άλατα αργιλίου για την καθίζηση λεπτών σωματιδίων.

Συνολικά, οι τεχνικές επεξεργασίας που εφαρμόζονται καθιστούν δυνατή την επίτευξη ποιότητας νερού που πληροί, σε αρκετές περιπτώσεις, ακόμα και πρότυπα πόσιμου νερού. Τα RHS προσφέρουν μια ολοκληρωμένη προσέγγιση για τη βιώσιμη διαχείριση των υδατικών πόρων, με σημαντικά περιβαλλοντικά, οικονομικά και κοινωνικά οφέλη (Ali, et al., 2025).

## 3.4 Πράσινοι τοίχοι / Green walls

### 3.4.1 Χαρακτηριστικά

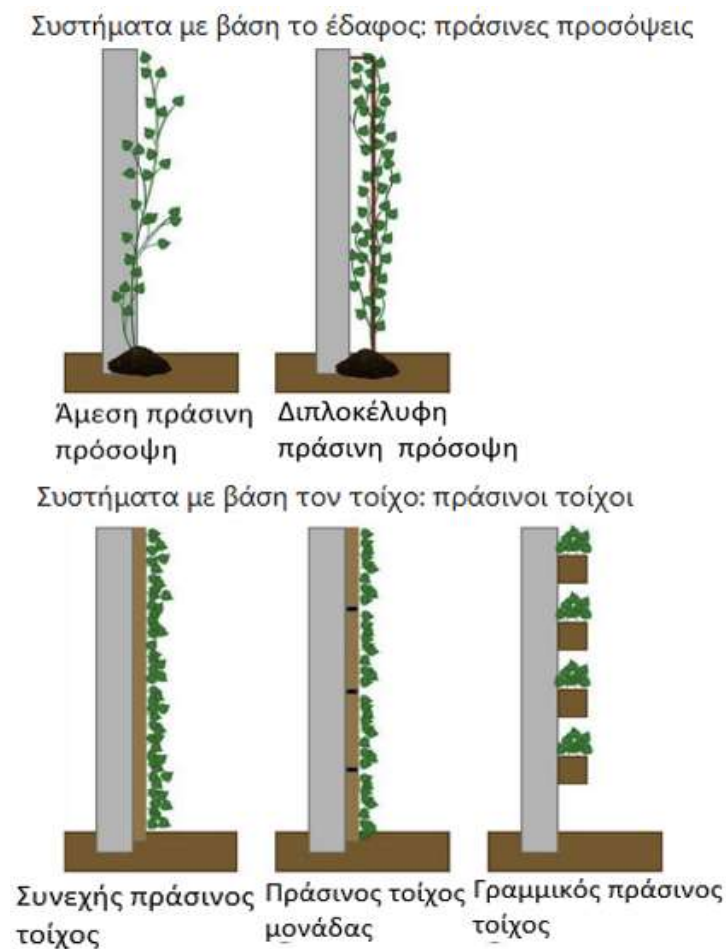
Οι πράσινοι τοίχοι κατηγοριοποιούνται σε δύο κατηγορίες: πράσινες προσόψεις (green façades) και ζωντανούς τοίχους (living walls), και υποκατηγοριοποιούνται περαιτέρω ανάλογα με τον τρόπο υποστήριξης του υποστρώματος και της βλάστησης, και μπορεί να διαφέρουν σημαντικά σε μέγεθος και πολυπλοκότητα. Οι πράσινες προσόψεις είναι επίσης γνωστές ως «πρασίνισμα προσόψεων» (*façade greening*), ενώ οι όροι «κάθετος κήπος» (*vertical garden*) και «ζωντανοί τοίχοι» (*living walls*) χρησιμοποιούνται συνήθως για τους πράσινους τοίχους.

Οι πράσινες προσόψεις ταξινομούνται περαιτέρω ανάλογα με τη θέση των φυτών, τα οποία μπορούν είτε να τοποθετηθούν απευθείας στο έδαφος είτε σε δοχεία με χώμα (planter boxes). Οι άμεσες πράσινες προσόψεις, όπως συναντώνται στην παραδοσιακή αρχιτεκτονική (traditional green façades), δεν απαιτούν δομική υποστήριξη, καθώς τα αναρριχώμενα φυτά προσκολλώνται στους εξωτερικούς τοίχους μέσω εναέριων ριζών ή αυτοκόλλητων βεντουζών. Οι έμμεσες πράσινες προσόψεις αναφέρονται ως διπλοκέλυφες πράσινες προσόψεις (double-skin green façades) και περιλαμβάνουν συστήματα στήριξης, όπως ανοξείδωτα καλώδια, αρθρωτές σχάρες ή ανοξείδωτα πλέγματα, τα οποία βοηθούν την ανοδική ανάπτυξη των φυτών, δημιουργώντας ένα δεύτερο στρώμα σε απόσταση από τον τοίχο.

Οι πράσινες προσόψεις περιλαμβάνουν αναρριχώμενα φυτά που καλύπτουν κατακόρυφες επιφάνειες και υποδιαιρούνται σε άμεσες και έμμεσες πράσινες προσόψεις. Ανάλογα με τη μέθοδο εφαρμογής, οι πράσινοι τοίχοι ταξινομούνται σε μονάδας (modular) ή συνεχείς (continuous). Επίσης υπάρχουν και κινητοί πράσινοι τοίχοι που μπορούν να τοποθετηθούν οπουδήποτε στην πόλη και συνήθως αποτελούνται από φυτεμένα δοχεία ή γλάστρες που είναι αφαιρούμενες. Οι συνεχείς πράσινοι τοίχοι (linear green wall) βασίζονται σε μία ενιαία δομή στήριξης, ενώ οι αρθρωτοί αποτελούνται από επιμέρους αρθρωτά στοιχεία που συναρμολογούνται για να δημιουργήσουν το σύνολο της πράσινης επιφάνειας. Όλοι οι τύποι φυτών μπορούν να χρησιμοποιηθούν, απλά για τα δέντρα, απαιτούνται μεγάλης κλίμακας περιοχές (Medl, et al., 2017). Ένας κάθετος κινητός κήπος είναι μια κάθετη, κινητή, φυτεμένη, αυτοστηριζόμενη μονάδα. Στερεώνεται σε μια πλατφόρμα κοντέινερ με γάντζο ανύψωσης. Σε αυτή τη δομή, διαφορετικά στρώματα τοποθετούνται κατά μήκος ενός υποστρώματος (μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί υδροπονία) στο οποίο μπορούν να αναπτυχθούν τα φυτά (Langergraber, et al., 2021).

Οι πράσινες όψεις περιλαμβάνουν συστήματα άμεσης πράσινης όψης, όπου η αναρριχώμενη ή κρεμαστή βλάστηση αναπτύσσεται απευθείας στον τοίχο, και συστήματα έμμεσης πράσινης όψης, που χρησιμοποιούν αποσπώμενους κάθετους υποστηρικτές, όπως πέργκολες, ατσάλινα καλώδια και σύρματα για τη στήριξη του υποστρώματος και της βλάστησης. Από την άλλη πλευρά, οι ζωντανοί τοίχοι κατηγοριοποιούνται σε αρθρωτούς και συνεχείς τύπους. Οι αρθρωτοί ζωντανοί τοίχοι αποτελούνται από διάφορα αρθρωτά δοχεία που περιέχουν υπόστρωμα και βλάστηση, όπως γλάστρες, πάνελ, συρμάτινα κλουβιά, δίσκους, δοχεία, πλακάκια, ευέλικτες σακούλες, κ.λπ. Συνδέονται σε μια συγκεκριμένη υποστηρικτική δομή, το ένα πάνω από το άλλο, έτσι ώστε εάν η βλάστηση σε μία μονάδα μαραθεί, η μονάδα αυτή

μπορεί να αντικατασταθεί εύκολα. Επιπλέον, οι συνεχείς ζωντανοί τοίχοι αποτελούνται από ένα ενιαίο φύλλο υλικού σε μορφή στρώματος ή διαπερατές δομές που περιέχουν μικρή ποσότητα υποστρώματος, κάνοντάς τους πολύ ελαφρύς, αλλά είναι πιο δύσκολοι στη συντήρηση, καθώς αποτελούν μία ενότητα και είναι λιγότερο εύκολα αντικαταστάσιμοι. Οι ζωντανοί τοίχοι απαιτούν πιο περίπλοκες μονάδες φύτευσης, συστήματα άρδευσης, δομική υποστήριξη, εξειδικευμένα υποστρώματα και απαιτήσεις εγκατάστασης σε σχέση με τις πράσινες όψεις, γεγονός που αυξάνει το συνολικό κόστος κατασκευής και συντήρησης. Ωστόσο, προσφέρουν ταχύτερη κάλυψη μεγάλων επιφανειών και πιο ομοιόμορφη ανάπτυξη κατά μήκος του τοίχου. Στην παρακάτω εικόνα 3 απεικονίζονται οι διάφοροι τύποι για πράσινους τοίχους και πράσινες προσόψεις, χωρισμένοι σε κατηγορίες ανάλογα με τον τρόπο βλάστησης τους.



**Εικόνα 3** Ταξινόμηση των κατακόρυφων συστημάτων πρασίνων κήπων. Πράσινες προσόψεις, μέθοδοι πρασίνων κήπων που βασίζονται στο έδαφος (άμεση και διπλή πράσινη πρόσοψη) και πράσινοι τοίχοι, μέθοδοι πράσινοι τοίχοι που βασίζονται σε τοίχους (συνεχείς, μοναδικό και γραμμικό πράσινο τοίχοι) Προσαρμογή εικόνας από (Medl, et al., 2017).

### 3.4.2 Επεξεργασία

Οι ζωντανοί τοίχοι μπορούν να επεξεργαστούν τα γκρίζα νερά με τυπική απομάκρυνση αζώτου (έως και 93%), αλλά λιγότερο φωσφόρου (67%). Ειδικά οι αρθρωτοί ζωντανοί τοίχοι έχουν πιο ευέλικτο σχεδιασμό, γεγονός που τους καθιστά πιο κατάλληλους για την επεξεργασία γκρίζων νερών (Moeen Gholami, 2023). Η επιλογή των υλικών επηρεάζει σημαντικά τα συστήματα των πράσινων τοίχων, με περιβαλλοντικές βελτιώσεις που προκύπτουν από τη χρήση βιομηχανικών αποβλήτων ή ανακυκλωμένων υλικών. Άλλοι παράγοντες που επηρεάζουν περιλαμβάνουν το κλάδεμα και την αφαίρεση ξερών φυτών, την αντικατάσταση παλιών και κατεστραμμένων πάνελ τοίχου, την άρδευση και τη λίπανση, καθώς και την ανακύκλωση υγρών αποβλήτων (Milad Reyhani, 2024).

Ακόμα τα κάθετα πράσινα συστήματα (VGSs) έχουν υψηλή αποτελεσματικότητα των σε συνδυασμό με επιτόπια αποθήκευση στην ενίσχυση της διαχείρισης όμβριων υδάτων στον αστικό χώρο. Οι ετήσιοι ρυθμοί μείωσης των όμβριων κυμάνθηκαν από 60% έως 100%, ανάλογα με το κλίμα, τον λόγο επιφάνειας τοιχοποιίας προς στέγη και τον λόγο όγκου αποθήκευσης προς επιφάνεια στέγης. Το σύστημα αποδείχθηκε ιδιαίτερα αποδοτικό στη διαχείριση συχνών και χαμηλής έντασης βροχοπτώσεων, επιτυγχάνοντας μειώσεις άνω του 80% για γεγονότα επαναφοράς 1,5 ετών.

Πέρα από τη διαχείριση των όμβριων, το σύστημα συνεισφέρει στη συνολική διαχείριση του αστικού υδρολογικού κύκλου, επιτυγχάνοντας αποκατάσταση της φυσικής υδατικής ισορροπίας και μείωση των θερμικών φορτίων μέσω αύξησης της εξατμισοδιαπνοής, γεγονός που συνεπάγεται και εξοικονόμηση ενέργειας. Ωστόσο, κακώς σχεδιασμένα συστήματα ενδέχεται να επιβαρύνουν το δίκτυο πόσιμου νερού, ειδικά κατά τις ξηρές περιόδους, καθιστώντας τον ορθό σχεδιασμό καθοριστικής σημασίας για τη μείωση της εξάρτησης, η οποία μπορεί να περιοριστεί έως και στο 3% της συνολικής ζήτησης νερού του κτιρίου (Moravej, et al., 2025).

## 3.5 Τεχνητοί υγροβιότοποι / Constructed Wetlands

### 3.5.1 Χαρακτηριστικά

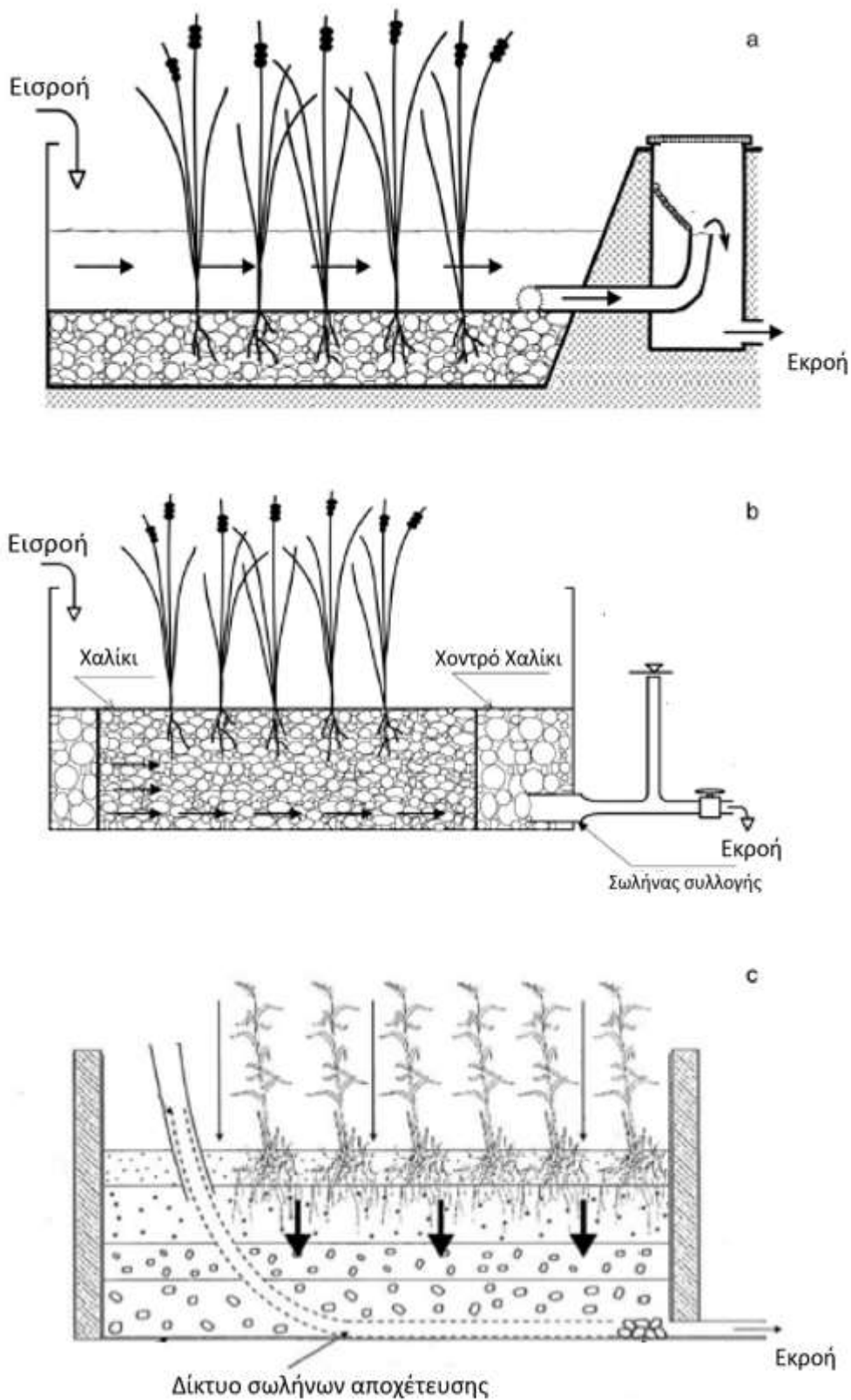
Οι τεχνητοί υγροβιότοποι έχουν εφαρμοστεί ευρέως για την επεξεργασία οικιακών λυμάτων, βιομηχανικών αποβλήτων, γεωργικών εκροών και ρυπασμένων υδάτινων σωμάτων. Ιστορικά, αποτέλεσαν τα πρώτα φυσικά συστήματα που χρησιμοποιήθηκαν για την επεξεργασία γκρίζων υδάτων. Αυτά τα συστήματα ανήκουν στις τεχνολογίες επιτόπιας επεξεργασίας λυμάτων, προσφέροντας οικονομικές και ενεργειακά αποδοτικές λύσεις για μικρές κοινότητες και περιοχές χωρίς αποχετευτικό σύστημα (Santos, et al., 2024).

Οι τεχνητοί υγροβιότοποι έχουν σχεδιαστεί για να μιμούνται τη φυσική διαδικασία επεξεργασίας λυμάτων και όμβριων υδάτων, χρησιμοποιώντας κατάλληλη βλάστηση και έδαφος. Διακρίνονται σε δύο κύριες κατηγορίες: υγροβιότοπους ελεύθερης επιφάνειας νερού και υγροβιότοπους με υπόγεια ροή. Η πρώτη κατηγορία αναφέρεται σε μια ανοιχτή περιοχή νερού, όπως μια σφραγισμένη λεκάνη ή αλληλουχία λεκανών, με επιπλέοντα, βυθισμένα και αναδύμενα φυτά. Οι υγροβιότοποι υποεπιφανειακής ροής διακρίνονται ανάλογα με τη ροή του νερού κάτω από την επιφάνεια σε οριζόντια ροή και κατακόρυφη ροή (Langergraber, et al., 2021). Οι τεχνητοί υγροβιότοποι κατηγοριοποιούνται ανάλογα με τα είδη φυτών που περιλαμβάνουν σε υγροβιότοπων με ελεύθερα επιπλέοντα φυτά, φυτά με επιπλέοντα φύλλα, αναδύμενα και υποβρύχια φυτά. Οι υγροβιότοποι με αναδύμενα φυτά χωρίζονται σε δύο κύριες κατηγορίες: επιφανειακής ροής (ελεύθερη επιφάνεια νερού) και υποεπιφανειακής ροής, η οποία περαιτέρω διακρίνεται σε κάθετη ροή και οριζόντια ροή (Carla S.S. Ferreira, 2023).

Δεδομένου ότι τα λύματα είναι δύσκολο να επεξεργαστούν σε ένα μόνο στάδιο, τα υβριδικά συστήματα που αποτελούνται από διάφορους τύπους υγροβιότοπων οργανωμένους σε σειρά και χρησιμοποιούνται κυρίως για την ενίσχυση της αφαίρεσης TN, καθώς οι διάφοροι τύποι υγροβιότοπων παρέχουν διαφορετικές συνθήκες οξειδοαναγωγής που είναι κατάλληλες για νιτροποίηση και απονιτροποίηση. Γενικά, οι τεχνητοί υγροβιότοπων με υπόγεια οριζόντια ροή μπορούν να παρέχουν καλές αναερόβιες συνθήκες για την απονιτροποίηση, ενώ η ικανότητα για νιτροποίηση της αμμωνίας είναι περιορισμένη. Αντίθετα, με την κάθετη υπόγεια ροή μπορούν να αφαιρούν το  $\text{NH}_3\text{-N}$  επιτυχώς λόγω των βέλτιστων αερόβιων συνθηκών, ενώ η απονιτροποίηση σχεδόν δεν πραγματοποιείται σε αυτά τα συστήματα.

Στην εικόνα 4 απεικονίζονται σχηματικές διατάξεις και τα τρία βασικά είδη τεχνητών υγροβιότοπων. Αρχικά οι τεχνητοί υγροβιότοπων με επιφανειακή ροή, τα οποία είναι κατασκευασμένα συνήθως διαθέτουν έναν ρηχό κλειστό λεκάνη ή σειρά από λεκάνες, φυτά με αναδύμενα μέρη και επιφάνεια νερού πάνω από το υπόστρωμα. Συγκεκριμένα, παρέχουν αποτελεσματική απορρόφηση μεταξύ των δευτερογενών εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων και των φυσικών υδάτινων οδών και μπορούν να αποτελέσουν μια βιώσιμη επιλογή για την οικολογική αποκατάσταση των ρυπασμένων ποταμών. Στην δεύτερη εικόνα απεικονίζεται μια σχηματική διάταξη για τεχνητούς υγροβιότοπους με υπόγεια οριζόντια ροή, η

οποία μπορούν να παρέχουν καλύτερη θερμική προστασία σε ψυχρό κλίμα σε αντίθεση με την κάθετη υπόγεια ροή όπως φαίνεται στην τελευταία εικόνα (Wang, et al., 2017).



**Εικόνα 4** Σχηματική διάταξη διαφορετικών τύπων τεχνικών υδροβιοτοπων. (α) ελεύθερη επιφανειακή ροή νερού b) οριζόντια υποεπιφανειακή ροή. (c) κάθετη υποεπιφανειακή ροή. Προσαρμογή εικόνας από (Wang, et al., 2017)

### 3.5.2 Επεξεργασία

Οι τεχνητοί υγρότοποι συμβάλλουν στον μετριασμό των αρνητικών επιπτώσεων της διάβρωσης του εδάφους στην ποιότητα του νερού, την απορροή και τα λύματα, μειώνοντας τα επίπεδα διάφορων οργανικών και ανόργανων ουσιών, όπως θρεπτικών συστατικών, βαρέων μετάλλων, φυτοφαρμάκων, υδρογονανθράκων, ξενοβιοτικών και αντιβιοτικών. Επιτυγχάνουν αυτό μέσω μηχανικών διεργασιών (ιζηματοποίηση, φιλτράρισμα), προσρόφησης στο υπόστρωμα, βιοπροσρόφησης και άλλων πιο σύνθετων και διασυνδεδεμένων διεργασιών μεταξύ φυτών και μικροοργανισμών, καθώς και απολύμανσης λόγω της υπεριώδους ακτινοβολίας από το ηλιακό φως. Η αποτελεσματικότητα των υγροτόπων στην απομάκρυνση ρύπων ποικίλλει με την πάροδο του χρόνου και εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του κάθε υγροτόπου, όπως τα είδη φυτών, το μέγεθος, οι ρύποι και το τοπικό κλίμα (Carla S.S. Ferreira, 2023). Ωστόσο, τα λύματα περιέχουν υψηλά επίπεδα νιτρικών ( $\text{NO}_3^-$ ), που προκαλούν ευτροφισμό. Παρότι υπάρχουν προηγμένες τεχνολογίες επεξεργασίας (π.χ. μεμβράνες, οξειδωση), το υψηλό κόστος και η δευτερογενής ρύπανση περιορίζουν τη χρήση τους.

Στον παρακάτω πίνακα 17 αναγράφονται οι μέσοι όροι εισροής και εκροής μετά την επεξεργασία του γκρίζου νερού για υγροβιότοπο με κάθετη (VF) και οριζόντια (HF) υποεπιφανειακή ροή με πυθμένα από καλάμι (reed bed). Οι κύριες διαφορές σε αυτές τις δύο κατηγορίες είναι η κατεύθυνση της ροής. Για την οριζόντια υποεπιφανειακή ροή το νερό ρέει οριζόντια κάτω από την επιφάνεια μέσω ενός στρώματος άμμου, εδάφους και χαλικιού ενώ για την κάθετη εφαρμόζεται με παλμούς και διηθείται κατακόρυφα μέσω στρωμάτων χαλικιού, άμμου και εδάφους πριν συλλεχθεί. Κάποιες άλλες διαφορές εντοπίζονται στην διαθεσιμότητα του οξυγόνου μιας και στη κατακόρυφη ροή τα επίπεδα είναι υψηλά λόγω κυκλοφορίας αέρα μεταξύ των εφαρμογών νερού ενώ στην οριζόντια είναι περιορισμένα, καθώς η ροή είναι κυρίως αναερόβια (Avery, 2007).

**Πίνακας 16** Μέση χαρακτηριστικά εισροής και εκροής για το γκρίζο νερό.

Παράμετρος	Επεξεργασία	Μέσος Όρος	Αποτελεσματικότητα αφαίρεσης
BOD (mg/L)	Εισροή	19.1±1.0	-
	HF Εκροή	2.3±0.2	87.8%
	VF Εκροή	1.3±0.1	93.1%
COD (mg/L)	Εισροή	80.9±3.6	-
	HF Εκροή	24.3±3.1	69.9%
	VF Εκροή	15.5±2.6	80.9%
Θολότητα (NTU)	Εισροή	17.4±1.6	-
	HF Εκροή	10.3±1.0	40.6%
	VF Εκροή	11.9±1.4	31.5%
SS (mg/L)	Εισροή	23.1±3.5	-
	HF Εκροή	4.7±0.6	79.7%
	VF Εκροή	2.0±0.3	91.5%
	Εισροή	7.3±0.0	-

pH	HF Εκροή	7.1±0.0	-
	VF Εκροή	7.0±0.0	-
Ολικά κολοβακτηρίδια (log10 CFU/100cm3)	Εισροή	5.7±0.1	-
	HF Εκροή	3.0±0.1	2.7
	VF Εκροή	0.8±0.1	4.8
<i>E. coli</i> (log10 (γ+1) CFU/100 cm3)	Εισροή	2.9±0.1	-
	HF Εκροή	0.7±0.1	2.2
	VF Εκροή	0.1±0.0	2.8
Faecal enterococci (log10CFU/100 cm3)	Εισροή	3.1±0.2	-
	HF Εκροή	1.4±0.1	1.6
	VF Εκροή	0.6±0.2	2.4
Νιτρικό άλας (mg/L)	Εισροή	1.5±0.2	-
	HF Εκροή	1.0±0.1	29.3%
	VF Εκροή	2.7±0.5	-81.1%
Αμμωνία (mg/L)	Εισροή	1.3±0.4	-
	HF Εκροή	1.0 ±0.2	20.6%
	VF Εκροή	0.1±0.1	89.3%
Φωσφορικό άλας (mg/L)	Εισροή	0.7±0.1	-
	HF Εκροή	0.3±0.1	62.6%
	VF Εκροή	0.1±0.1	84.4%
Πηγές		(Avery, 2007)	

Οι μικροβιακοί δείκτες υπολογίστηκαν ως μείωση καταγραφής.

Η μεγαλύτερη απομάκρυνση παρατηρείται στο BOD, COD, αμμωνία (NH<sub>3</sub>-N), στη θολότητα (turbidity) και στα αιωρούμενα στερεά (SS), για την μέθοδο VF. Αντίθετα, η απομάκρυνση των ολικών κολοβακτηριοειδών και των εντερόκοκκων είναι σχετικά χαμηλή και για τις δύο μεθόδους, με την VF να έχει ελαφρώς καλύτερα αποτελέσματα. Συνολικά, η VF μέθοδος φαίνεται πιο αποτελεσματική στις περισσότερες κατηγορίες, ειδικά σε διαλυτά ρυπαντικά στοιχεία όπως BOD, COD, νιτρικά και αμμωνία.

Η έλλειψη φυσικών υδάτινων πόρων έχει οδηγήσει την επιστημονική κοινότητα να διερευνήσει σε βάθος την επαναχρησιμοποίηση γκρίζων υδάτων ως βιώσιμη εναλλακτική λύση για την κάλυψη των υδατικών αναγκών στη γεωργία. Από την οπτική της βιωσιμότητας και της κυκλικής οικονομίας, η επαναχρησιμοποίηση νερού από την επεξεργασία λυμάτων μπορεί να αποτελέσει έναν πολύτιμο πόρο, ιδιαίτερα για χώρες που αντιμετωπίζουν σοβαρή λειψυδρία. Ωστόσο, η εξασφάλιση της ποιότητας του επεξεργασμένου νερού σύμφωνα με τα κανονιστικά πρότυπα για συγκεκριμένες εφαρμογές επαναχρησιμοποίησης είναι ζωτικής σημασίας για την ασφάλεια και τη συμμόρφωση με τη νομοθεσία. Με την κατάλληλη επεξεργασία και αφαίρεση των βλαβερών ουσιών, το νερό αυτό μπορεί να είναι κατάλληλο για πόση ή για αγροτική χρήση καλύπτοντάς έτσι το πλέγμα Νερού- Τροφής.

Η ασφαλής επαναχρησιμοποίηση λυμάτων απαιτεί αποτελεσματική απομάκρυνση θρεπτικών συστατικών όπως το άζωτο και ο φώσφορος, χημικών ουσιών όπως τα λιπάσματα, βαρέων μετάλλων και παθογόνων οργανισμών που μπορεί να είναι επιβλαβείς για το οικοσύστημα και

την ανθρώπινη υγεία. Επιπλέον, η παρουσία αναδυόμενων ρύπων, όπως φαρμακευτικά κατάλοιπα και μικροπλαστικά, συνιστά μια συνεχιζόμενη πρόκληση που απαιτεί προηγμένες μεθόδους επεξεργασίας. Η αδυναμία διαχείρισης της επαναχρησιμοποίησης νερού ως οικοσυστημική υπηρεσία ενδέχεται να οδηγήσει σε εξάντληση των αποθεμάτων πόσιμου νερού, ενός κρίσιμου και πεπερασμένου φυσικού πόρου.

Διάφορες μεθοδολογίες έχουν αναπτυχθεί για την αξιολόγηση της καταλληλότητας του νερού για επαναχρησιμοποίηση, όπως οι περιφερειακές εκτιμήσεις κινδύνου βάσει ροής. Οι σύγχρονες προσεγγίσεις περιλαμβάνουν πολλαπλές μεθόδους ανάλυσης, όπως ιστοτοπικές τεχνικές, τριγωνικές διαγράμματα και πολυκριτηριακή ανάλυση αποφάσεων. Ο Δείκτης Ποιότητας Νερού (Water Quality Index - WQI) αποτελεί ένα από τα πιο αξιόπιστα εργαλεία παρακολούθησης της ποιότητας επιφανειακών και υπόγειων υδάτων, παρέχοντας μια συνοπτική αξιολόγηση της καταλληλότητας του νερού για ανθρώπινη κατανάλωση και άρδευση.

Η έρευνα για καινοτόμες και οικονομικά αποδοτικές τεχνολογίες επεξεργασίας ανακυκλωμένου νερού είναι συνεχής. Οι λύσεις που βασίζονται στη φύση, όπως οι τεχνητοί υγρότοποι, αποτελούν βιώσιμες εναλλακτικές, καθώς συνδυάζουν αποτελεσματικότητα στην επεξεργασία λυμάτων με χαμηλό κόστος λειτουργίας συγκριτικά με τις συμβατικές τεχνολογίες. Συστηματικές μελέτες έχουν αναλύσει την αποδοτικότητα πιλοτικών συστημάτων τεχνητών υγροτόπων για την επεξεργασία γκρίζων υδάτων, καταγράφοντας σημαντικά ποσοστά απομάκρυνσης οργανικών ρύπων, θρεπτικών ουσιών και βαρέων μετάλλων. Παρά τις προκλήσεις που σχετίζονται με την παρουσία αναδυόμενων ρύπων, η επιστημονική κοινότητα συνεχίζει να διερευνά αποτελεσματικές μεθόδους απομάκρυνσής τους, προκειμένου να διασφαλιστεί η λειτουργία και η αποδοτικότητα των συστημάτων επαναχρησιμοποίησης νερού (Santos, et al., 2024).

## 3.6 Συστήματα Βιοκατακράτησης / Bioretention systems (BRS)

### 3.6.1 Χαρακτηριστικά

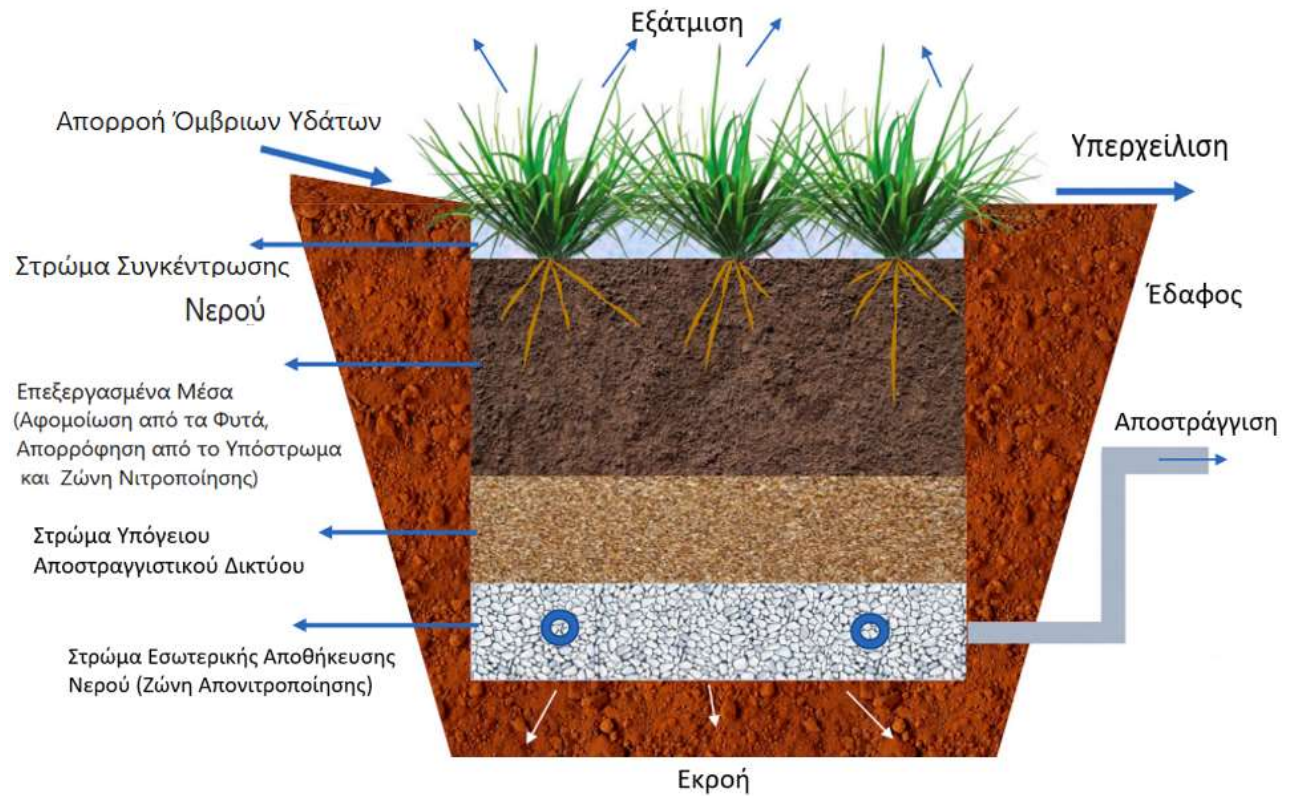
Τα συστήματα βιοκατακράτησης (Bioretention Systems - BRS) λειτουργούν ως αποτελεσματικές λύσεις βασισμένες στη φύση για την αντιμετώπιση προβλημάτων ποιότητας και υδρολογίας των όμβριων υδάτων που προκύπτουν από τη ραγδαία αστικοποίηση και την παγκόσμια κλιματική αλλαγή. Χρησιμοποιούνται ευρέως ως μέθοδος ήπιας ανάπτυξης για τη διαχείριση των όμβριων υδάτων και περιλαμβάνουν κήπους βροχής, βιοδιήθηση και βιολογική κατακράτηση (Basanta Kumar Biswal, 2022). Ένας από τους λόγους για τη δημοτικότητα των συστημάτων βιοκατακράτησης είναι η ευελιξία στον σχεδιασμό τους, που διευκολύνει την απλή ενσωμάτωσή τους (αναδρομική προσαρμογή) σε υπάρχουσες αστικές περιοχές. Επιπλέον, θεωρείται ότι προσφέρουν μια σειρά από οφέλη πέρα από τις συμβατικές λειτουργίες που αφορούν την ποιότητα και ποσότητα των ομβρίων υδάτων, όπως αισθητικά και κοινωνικά οφέλη (Lucke, 2015).

Εγκαθίστανται κυρίως κοντά στην πηγή και παρέχουν πολλαπλές υπηρεσίες, όπως μείωση των αιχμών ροής, μείωση του όγκου απορροής και απορρύπανση των όμβριων υδάτων. Αυτά τα συστήματα παρουσιάζουν μεγάλη διαφοροποίηση στην απόδοση απομάκρυνσης ρύπων και επαναφόρτισης του υπόγειου νερού, ενώ μειώνουν τον αντίκτυπο της αστικοποίησης στην ποιότητα και την ποσότητα του νερού. Αυτές οι διαφοροποιήσεις συνδέονται με διάφορους παράγοντες, όπως το μέγεθος των βροχοπτώσεων, η ποικιλότητα των ειδών φυτών ή οι τοπικές περιβαλλοντικές συνθήκες (Basanta Kumar Biswal, 2022).

Στην Εικόνα 6 απεικονίζονται οι κύριοι παράγοντες που συνιστούν το σύστημα βιοκατακράτησης όπως είναι η βλάστηση στην κορυφή, ακολουθούμενη από το υπόστρωμα (μέσα ανάπτυξης), το υλικό/μονάδα αποστράγγισης και το υπόγειο αποστραγγιστικό δίκτυο. Συγκεκριμένες οδηγίες σχεδιασμού έχουν αναπτυχθεί για την εγκατάσταση και λειτουργία συστημάτων βιοκατακράτησης, αλλά μόνο για επιλεγμένες γεωγραφικές περιοχές. Η υιοθέτηση αυτών των οδηγιών χωρίς να ληφθούν υπόψη οι τοπικές υποδομές και οι κλιματικές συνθήκες συχνά οδηγεί σε αποτυχίες λειτουργίας των συστημάτων βιοκατακράτησης, με τις οποίες είναι αντιμέτωπες πολλές δημοτικές αρχές σήμερα.

Ο ρόλος της βλάστησης στα συστήματα βιοκατακράτησης εκτείνεται πολύ πέρα από τη συμβολή της στην αισθητική, προωθεί διάφορες φυσικές διεργασίες και ενισχύει σημαντικά τη βιωσιμότητα των πόλεων. Μεταξύ των ωφελειών της περιλαμβάνονται η διήθηση, η διύλιση και η αποθήκευση των όμβριων υδάτων, η δημιουργία οικοτόπων, η διατήρηση της τοπικής χλωρίδας και η μείωση της διάβρωσης που προκαλείται από τη μετακίνηση του εδάφους. Επιπλέον, η βλάστηση μπορεί να συμβάλλει στη μείωση των τοπικών θερμοκρασιών. Τα κύρια κριτήρια για την επιλογή της βλάστησης περιλαμβάνουν τη χρήση ιθαγενών ειδών, την ποικιλομορφία σε μορφή και μέγεθος, τις χαμηλές απαιτήσεις συντήρησης, την ικανότητα καθαρισμού του νερού, την αντοχή σε πλημμύρες και ξηρασία, την παρουσία πασσαλώδους ρίζας, την πυκνότητα των φύλλων, τις χαμηλές απαιτήσεις εισροών στο υπόστρωμα, τη γρήγορη ανάπτυξη, τις βαθιές ρίζες και την ταχεία αναγέννηση. Πέρα από την αισθητική της αξία, η φυτική ποικιλότητα ενισχύει τη λειτουργική συμπληρωματικότητα στα συστήματα

βιοκατακράτησης. Αυτό το χαρακτηριστικό προσφέρει ένα σημαντικό πλεονέκτημα, καθώς βελτιώνει την ικανότητα αυτών των δομών να προσαρμόζονται στη χωρική και χρονική μεταβλητότητα των διαφορετικών περιβαλλοντικών συνθηκών, όπως η διαθεσιμότητα νερού. (Sousa, et al., 2025)



**Εικόνα 5** Σχηματική Αναπαράσταση Βιοκατακράτησης με Διάταξη Εσωτερικής Αποθήκευσης Νερού. Προσαρμογή εικόνας από (Vijayaraghavan, et al., 2021)

Το κόστος που σχετίζεται με την κατασκευή, λειτουργία και συντήρηση των συστημάτων βιοκατακράτησης έχει αποδειχθεί ότι είναι εξαιρετικά μεταβλητό και εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τους στόχους του σχεδιασμού και τη φύση των χώρων εγκατάστασης (Vijayaraghavan, et al., 2021).

### 3.6.2 Επεξεργασία

Ο έλεγχος της απορροής όμβριων υδάτων και η μείωση της ρύπανσης μπορούν να επιτευχθούν μέσω των BRS, που αποτελούνται κυρίως από ένα εξαιρετικά διαπερατό φίλτρο υποστρώματος και φυτική κάλυψη στην κορυφή. Πολλαπλές διαδικασίες λαμβάνουν χώρα όταν η απορροή όμβριων υδάτων εισέρχεται στα BRS, συμπεριλαμβανομένων της διήθησης, της καταβύθισης, της προσρόφησης, της πρόσληψης από φυτά και της βιολογικής αφομοίωσης και μετατροπής. Ως αποτέλεσμα, τα BRS μπορούν να συγκρατήσουν μεγάλο αριθμό ρύπων, θεωρούμενα ως αποτελεσματικός τρόπος απομάκρυνσης ρύπων από τα όμβρια ύδατα (Jin Su, 2024).

Η αξιολόγηση της βιοκατακράτησης έδειξε ότι μπορεί να μειώσει την αιχμή της απορροής έως και 96,5% κατά τη διάρκεια μικρών και μεσαίου μεγέθους καταιγίδων, γεγονός που αποτελεί εξαιρετικό αποτέλεσμα λόγω των φυσικοχημικών της ιδιοτήτων (Demuzere et al., 2014). Η αποδοτικότητα απομάκρυνσης του συνολικού φωσφόρου, του συνολικού αζώτου και των συνολικών αιωρούμενων στερεών από επιλεγμένα εργαστηριακά πεδία κυμαίνεται μεταξύ 52%–99%, 65%–99% και 59%–99%, αντίστοιχα.

Εκτός από τη βελτίωση της ποιότητας του νερού, οι υποδομές πράσινης ανάπτυξης μπορούν να ενισχύσουν σημαντικά και την ποιότητα του αέρα στις αστικές περιοχές, μέσω της μείωσης του θορύβου, της απομάκρυνσης ατμοσφαιρικών ρύπων και της πρόληψης της έκθεσης σε ρυπογόνες ουσίες. Η βελτίωση του ηχητικού περιβάλλοντος επιτυγχάνεται κυρίως μέσω της απορρόφησης της ηχητικής ενέργειας από τα φύλλα, που αποτελεί τον βασικό μηχανισμό εξάλειψης του θορύβου (Liu, et al., 2020).

Ο πίνακας 18 αναγράφει τα ποσοστά αφαίρεσης σε συστήματα βιοκατακράτησης στην Αυστραλία και στις Η.Π.Α.

**Πίνακας 17** Ποσοστό αφαίρεσης σε συστήματα βιοκατακράτησης % (Bioretention Systems - BRS).

Τοποθεσία	TN	TP	NH <sub>3</sub> -N	NO <sub>3</sub> -N	Πηγές
Μέριλαντ, Η.Π.Α.	9.7	-	82	-137	(Liqing Li, 2014)
Καλούντρα, Αυστραλία	-84.8	26.8	-	-47.1	(Lucke, 2015)
Μέριλαντ, Η.Π.Α.	-	84	-	-	(Jiayu Liu, 2013)

Ο πίνακας 18 παρουσιάζει ποσοστά αφαίρεσης διαφορετικών στοιχείων (TN, TP, NH<sub>3</sub>-N, NO<sub>3</sub>-N) από διάφορες πηγές. Παρατηρείται ότι τα ποσοστά αφαίρεσης διαφέρουν σημαντικά ανάμεσα στις μελέτες, πιθανότατα λόγω διαφορών στις συνθήκες, τις μεθοδολογίες ή τα χαρακτηριστικά των συστημάτων βιοκατακράτησης. Οι υψηλότερες επιδόσεις καταγράφονται στο NH<sub>3</sub>-N και TP με ποσοστά άνω του 80% στις Η.Π.Α.

Ένα σύστημα βιοκατακράτησης με συμβατική άμμο (CB-BRS) και δύο τροποποιημένα συστήματα βιοκατακράτησης, το σύστημα βιοκατακράτησης μικροβιακού καυσίμου-βιοάνθρακα (MB-BRS) και το σύστημα βιοκατακράτησης πυρολουσίτη-μικροβιακού καυσίμου-βιοάνθρακα (PMB-BRS), δημιουργήθηκαν. Οι επιδράσεις των 0,5 mg/L νανοπλαστικών πολυμεθυλμεθακρυλικού (PMMA NPs) στην απομάκρυνση θρεπτικών συστατικών, στις δομές των μικροβιακών κοινοτήτων, καθώς και στις δραστηριότητες βασικών ενζύμων, στα λειτουργικά γονίδια και στα γονίδια ανοχής στα αντιβιοτικά (ARGs) μελετήθηκαν εκτενώς σε διάστημα 120 ημερών έκθεσης (Yan Xu, 2024).

Ο πίνακας 18 παρουσιάζει δεδομένα σχετικά με την αποδοτικότητα απομάκρυνσης ρύπων από τα λύματα και τις συγκεντρώσεις των εκροών για διάφορες παραμέτρους, όπως COD (Χημική Ζήτηση Οξυγόνου), αμμώνιο (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N), ολικό άζωτο (TN), ολικό φώσφορο (TP) και βαρέα μέταλλα (Fe, Mn, Zn).

**Πίνακας 18** Αποτελεσματικότητα απομάκρυνσης ρύπων από επεξεργασμένα εκροές νερού βροχής για διαφορά συστήματα βιοκατακράτησης

Παράμετρος	Εκροές (mg/L)	Αποτελεσματικότητα αφαίρεσης (%)
<b>COD (Χημική Ζήτηση Οξυγόνου)</b>	26.67 ± 9.02	87.93 ± 4.10
<b>NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N (Αμμώνιο)</b>	CB-BRS: 0.42 ± 0.32 MB-BRS: 0.46 ± 0.48 PMB-BRS: 2.36 ± 0.38	CB-BRS: 97.23 ± 2.13 MB-BRS: 96.94 ± 3.22 PMB-BRS: 84.17 ± 2.56
<b>TN (Ολικό άζωτο)</b>	CB-BRS: 13.72 ± 2.45 MB-BRS: 8.05 ± 1.31 PMB-BRS: 7.40 ± 1.65	CB-BRS: 54.23 ± 8.51 MB-BRS: 89.91 PMB-BRS: 75.33 ± 5.56
<b>TP (Ολικός φώσφορος)</b>	CB-BRS: 0.51 ± 0.15 MB-BRS: 0.37 ± 0.15 PMB-BRS: 0.07 ± 0.03	CB-BRS: 77.75 ± 5.13 MB-BRS: 90.84 ± 5.13 PMB-BRS: 96.65 ± 1.92
<b>Βαρεα Μέταλλα (Fe, Mn, Zn)</b>	Fe: 21.00 µg/L Mn: 73.70 µg/L Zn: 108.00 µg/L	

Παρατηρείται ότι η συνολική αποδοτικότητα του συστήματος είναι υψηλή, ειδικά όσον αφορά την απομάκρυνση του αμμωνίου και του ολικού φωσφόρου. Το PMB-BRS έχει την καλύτερη απόδοση στην απομάκρυνση του φωσφόρου, ενώ το MB-BRS είναι πιο αποτελεσματικό στην απομάκρυνση του ολικού αζώτου.

## 3.7 Κήπος Βροχής / Rain garden

### 3.7.1 Χαρακτηριστικά

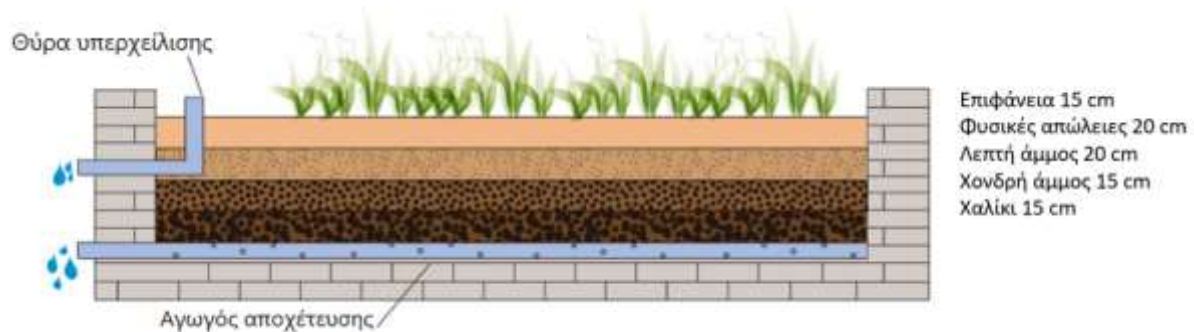
Οι κήποι βροχής προσφέρουν οφέλη τόσο στην ποσότητα όσο και στην ποιότητα του νερού, καθώς ενισχύουν τη βιοποικιλότητα στα αστικά οικοσυστήματα, ομορφαίνουν τα τοπία και υποστηρίζουν τη δημόσια αναψυχή. Οι κήποι βροχής είναι κατάλληλοι τόσο για ζεστό όσο και για κρύο καιρό και σχεδιάζονται χαμηλότεροι από την επιφάνεια του εδάφους, ώστε η απορροή να μπορεί να ρέει και να αποθηκεύεται μέσα στον κήπο. Παρέχουν επιπλέον όγκο αποθήκευσης, μειώνοντας την ποσότητα της απορροής που καταλήγει στα συστήματα αποχέτευσης όμβριων υδάτων, περιορίζοντας έτσι τη δημιουργία λιμναζόντων υδάτων και τις πλημμύρες. Επιπλέον, φιλτράρουν και συγκρατούν ρύπους από την απορροή, μειώνοντας την πιθανότητα ρύπανσης ποταμών. Υπάρχοντες κήποι και μη διαπερατές επιφάνειες μπορούν να μετατραπούν σε κήπους βροχής με ελάχιστες τροποποιήσεις. Επομένως, οι κήποι βροχής γίνονται ευρέως αποδεκτοί ως μέτρα προσαρμογής στην κλιματική αλλαγή, συνεισφέροντας στην ανάπτυξη χαμηλού αντίκτυπου με βέλτιστες πρακτικές διαχείρισης, και πράσινες υποδομές για τη δημιουργία πιο ανθεκτικών πόλεων (Chi-Feng Chen, 2024).

Ένας κήπος βροχής αποτελείται κυρίως από μια στρώση αποθήκευσης νερού, μια στρώση φύτευσης βλάστησης, μια στρώση υλικού πλήρωσης και μια στρώση αποστράγγισης στο κάτω μέρος. Οι κήποι βροχής, αποτελούνται κυρίως από στρώμα αποθήκευσης νερού, στρώμα φύτευσης, στρώμα υλικού πλήρωσης και στρώμα αποστράγγισης στον πυθμένα. Μέσω των στρωμάτων αποθήκευσης και πλήρωσης, τα όμβρια ύδατα συγκρατούνται ώστε να καθυστερεί η κορύφωση της ροής και να μειώνεται η απορροή, ενώ παράλληλα τα όμβρια ύδατα καθαρίζονται μέσω καθίζησης, διήθησης, απορρόφησης και μικροοργανισμών.

Για τη βελτίωση της απόδοσης ρύθμισης των κήπων βροχής, οι επιστήμονες άρχισαν να βελτιστοποιούν τις παραμέτρους σχεδιασμού και να βελτιώνουν τα χαρακτηριστικά του υλικού πλήρωσης και τα πρότυπα ροής.

Ένα παράδειγμα πειραματικού κήπου βροχής βρίσκεται δίπλα σε ένα κτίριο στο Πανεπιστήμιο Χί'αν, στην επαρχία Shaanxi, και έχει 4 μέτρα μήκος, 3 μέτρα πλάτος και 0,9 μέτρα βάθος. Χρησιμοποιείται για την επεξεργασία της απορροής όμβριων υδάτων που συλλέγονται από τη στέγη του κτιρίου. Το βάθος του υλικού πλήρωσης είναι 70 cm και περιλαμβάνει 20 cm χώματος, 20 cm λεπτής άμμου, 15 cm χονδρής άμμου και 15 cm χαλικιού. Στον πυθμένα υπάρχει διάτρητος σωλήνας αποστράγγισης, που φιλτράρει την απορροή και την απορρίπτει στο δημοτικό δίκτυο (Tang, 2024). Παρακάτω στην εικόνα 7 απεικονίζεται το προφίλ ενός συνηθισμένου κήπου βροχής όπως ο πειραματικός κήπος στην επαρχία Shaanxi.

**Εικόνα 6** Ένα συνηθισμένο το προφίλ κήπου βροχής. Προσαρμογή εικόνας από (Tang, 2024)



Παραδοσιακά, ένας κήπος βροχής κατασκευάζεται ως μια ρηχή κοιλότητα στο τοπίο που δέχεται απορροή κατά τη διάρκεια μιας βροχόπτωσης. Δέντρα, θάμνοι και ποώδη καλλωπιστικά φυτά φυτεύονται μαζί με μια στρώση εδαφοκάλυψης (Morash, et al., 2019).

### 3.7.2 Επεξεργασία

Μέσω της στρώσης αποθήκευσης νερού και της στρώσης υλικού πλήρωσης, συγκρατείται η απορροή της βροχής για να καθυστερήσει η αιχμή και να μειωθεί η απορροή, ενώ η απορροή των ομβρίων υδάτων καθαρίζεται μέσω καθίζησης, διήθησης, απορρόφησης και μικροοργανισμών. Επίσης επισημαίνεται ότι οι εποχιακές μεταβολές και άλλοι καιρικοί παράγοντες επηρεάζουν σημαντικά την απόδοση των κήπων βροχής. Οι κήποι βροχής απομακρύνουν αποτελεσματικά τα ιζήματα, τα βαρέα μέταλλα και τον συνολικό φώσφορο από την απορροή όμβριων υδάτων, με αποδοτικότητα απομάκρυνσης που υπερβαίνει το 60%. Ωστόσο, η αποδοτικότητα απομάκρυνσης του συνολικού αζώτου κυμαίνεται μεταξύ 15% και 65%, υποδεικνύοντας ασταθή απόδοση απομάκρυνσης. Η αποδοτικότητα απομάκρυνσης για το νιτρικό άζωτο ήταν χαμηλή, γενικά κάτω από 20%, συχνά οδηγώντας σε καθαρή έκλυση λόγω έκπλυσης. Για τη βελτίωση της ρυθμιστικής επίδρασης των κήπων βροχής για την απορροή όμβριων υδάτων, μετά από πολλές μελέτες πολλοί επιστήμονες παρατήρησαν ότι με την βελτίωση του υλικού πλήρωσης και τα πρότυπα ροής η αποδοτικότητα απομάκρυνσης φορτίου του νιτρικού αζώτου μπορεί να φτάσει πάνω από 70% μετά την εγκατάσταση εσωτερικής αποθήκευσης νερού στον πυθμένα του κήπου βροχής, ενώ η αποδοτικότητα απομάκρυνσης του νιτρικού αζώτου βελτιώθηκε σημαντικά με τη δημιουργία αναερόβιων συνθηκών στον πυθμένα. Μελέτες πεδίου σε τρεις κήπους βροχής στη Βόρεια Καρολίνα έδειξαν ότι οι κήποι αυτοί μείωσαν αποτελεσματικά την απορροή, επιτυγχάνοντας μέσο ποσοστό μείωσης 78% για την απορροή και 99% για την κορύφωση της ροής. Ωστόσο, διαπιστώθηκε ότι οι εποχιακές μεταβολές και άλλοι παράγοντες καιρού επηρεάζουν σημαντικά την απόδοση των κήπων βροχής. Οι κήποι βροχής απομακρύναν αποτελεσματικά ιζήματα, βαρέα μέταλλα και ολικό φώσφορο από την απορροή όμβριων υδάτων, με αποδοτικότητες που ξεπερνούσαν το 60%. Παρ' όλα αυτά, η αποδοτικότητα απομάκρυνσης του συνολικού αζώτου κυμαίνεται από 15% έως 65%, υποδεικνύοντας ασταθή απόδοση (Tang, 2024). Στον παρακάτω πίνακα 19

παρουσιάζεται το ποσοστό αφαίρεσης διαφορετικών ρύπων από τα υδάτων χάρις την επεξεργασία που υπέστησαν από τους κήπους βροχής στο πανεπιστήμιο Χί'αν στην Κίνα.

**Πίνακας 19** Ποσοστό αφαίρεσης %.

Πηγές	TN	TP	NH <sub>3</sub> -N	NO <sub>3</sub> -N	Πηγές
Χί'αν University, China	27.86	7.26	82.96	45.78	(Tang, 2024)

Ο πίνακας 20 δείχνει ότι, παρά τις υψηλές επιδόσεις στην απομάκρυνση NH<sub>3</sub>-N, υπάρχουν περιθώρια βελτίωσης όσον αφορά την ολοκληρωμένη διαχείριση των ρύπων, ιδίως του φωσφόρου. Παρατηρείται πολύ υψηλό ποσοστό απομάκρυνσης NH<sub>3</sub>-N (82.96%), γεγονός που υποδηλώνει ότι έχει ισχυρή ικανότητα κατακράτησης ή μετατροπής της αμμωνίας σε λιγότερο επιβλαβείς ενώσεις.

Με την τροποποίηση του υλικού πλήρωσης, με την προσθήκη στρώματος χαλικιού πάνω από το στρώμα εδάφους και την επιμήκυνση του χρόνου υδραυλικής κατακράτησης, αύξησε την απόδοση. Η αποδοτικότητα απομάκρυνσης του συνολικού φωσφόρου (TP), των συνολικών αιωρούμενων στερεών (TSS) και του συνολικού αζώτου (TN) έφτασε το 51,0%, 89,0% και 49,0% αντίστοιχα. Συγκριτικές μελέτες μεταξύ μεμονωμένων κήπων βροχής και συνδυασμού τους με δεξαμενές έδειξαν ότι η ενσωμάτωση κήπων βροχής σε σειρά με δεξαμενή αύξησε το ποσοστό μείωσης της απορροής κατά περίπου 10%. Παρά τις προσπάθειες βελτιστοποίησης του σχεδιασμού, η αποδοτικότητα μείωσης της απορροής και της απομάκρυνσης αζώτου και φωσφόρου διαφέρει σημαντικά υπό διαφορετικές συνθήκες (Tang, 2024).

#### 4. Πλέγμα Νερού-Ενέργειας-Τροφίμων-Οικοσυστημάτων (Water-Energy-Food-Ecosystem, WEFE Nexus)

Στη σύγχρονη εποχή, που χαρακτηρίζεται από έντονες οικολογικές, κοινωνικοοικονομικές και γεωπολιτικές κρίσεις, μία από τις πλέον κρίσιμες προκλήσεις είναι η διασφάλιση της βιωσιμότητας και της ασφάλειας στην παροχή βασικών πόρων, όπως το νερό, τα τρόφιμα και η ενέργεια. Τα συστήματα που αφορούν τον κύκλο ζωής και τη διακυβέρνηση αυτών των πόρων είναι άρρηκτα συνδεδεμένα, γεγονός που έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη εννοιολογικών “πλεγμάτων” στην έρευνα και τη χάραξη πολιτικής. Τα πλέγματα αυτά αποσκοπούν στην ανάλυση των αλληλεξαρτήσεων μεταξύ αυτών των τομέων, προκειμένου να προωθηθούν ολοκληρωμένες προσεγγίσεις διαχείρισης.

Η διασύνδεση μεταξύ των παγκόσμιων συστημάτων νερού, ενέργειας και τροφίμων (πλέγμα W-E-F) έχει αποκτήσει ιδιαίτερη σημασία τα τελευταία χρόνια, λόγω της στενής και αλληλοεξαρτώμενης σχέσης μεταξύ αυτών των κρίσιμων πόρων. Ειδικότερα, η προσέγγιση του πλεγματος WEFE αναδεικνύει την αλληλεξάρτηση της ασφάλειας των υδάτινων πόρων, της ενέργειας, των τροφίμων και της προστασίας των οικοσυστημάτων. Στοχεύει στην αντιμετώπιση σύνθετων κοινωνικό-οικολογικών προκλήσεων που εκτείνονται σε αυτούς τους τομείς, σε τοπικό, περιφερειακό και παγκόσμιο επίπεδο (Nikolaos P. Nikolaidis, et al., 2025). Το πλέγμα WEFE Nexus προσεγγίζει τη διαχείριση του νερού, της ενέργειας, των τροφίμων και των οικοσυστημάτων ως αλληλοεξαρτώμενα και αλληλοσυνδεδεμένα συστήματα (Genevieve Bennett, et al., 2016)

Η ενέργεια εξαρτάται από το νερό για την εξόρυξη ορυκτών καυσίμων, την παραγωγή βιοκαυσίμων, την υδροηλεκτρική ενέργεια και την ψύξη των σταθμών παραγωγής. Η εκμετάλλευση των υδρογονανθράκων, ως ορυκτών καυσίμων και μεταλλευμάτων, απαιτεί από μικρές έως πολύ μεγάλες ποσότητες νερού και ενέργειας, με σοβαρές περιβαλλοντικές επιπτώσεις, ιδιαίτερα στην ποιότητα των υδατικών πόρων. Αν και η χρήση νερού για την παραγωγή ενέργειας είναι σημαντικά χαμηλότερη με αυτήν της γεωργίας (εκτός από άνυδρες περιοχές), προκαλεί έντονες κοινωνικές αναταράξεις λόγω μετακινήσεων πληθυσμών και υποβάθμισης της ποιότητας των υδατικών πόρων (Cesar, et al., 2019).

Παράλληλα, το νερό αποτελεί βασικό παράγοντα της γεωργίας, ιδίως για την άρδευση. Η γεωργία, ως ο μεγαλύτερος χρήστης νερού παγκοσμίως, αντιμετωπίζει αυξανόμενες πιέσεις λόγω της ραγδαίας αύξησης του πληθυσμού και των μεταβολών στις διατροφικές συνήθειες. Οι πιέσεις αυτές αναμένεται να επιδεινώσουν τη διαθεσιμότητα των υδάτινων πόρων (Genevieve Bennett, et al., 2016).

Η γεωργία τον τομέα με την μεγαλύτερη κατανάλωση νερού στην περιφέρεια και συνδέεται άμεσα με φαινόμενα αποψίλωσης, διάβρωσης, ρύπανσης και εκτοπισμού τοπικών πληθυσμών. Ιδιαίτερη σημασία αποκτά η γεωργία μεγάλης κλίμακας, κυρίως εξαγωγικού χαρακτήρα, εις βάρος της οικογενειακής και αυτοσυντηρούμενης γεωργίας, η οποία είναι κρίσιμη για την επισιτιστική ασφάλεια. Ο τομέας της παραγωγής βιοκαυσίμων, ο οποίος αναπτύσσεται συγκεντρώνει ταυτόχρονα τις επιπτώσεις της γεωργίας μεγάλης κλίμακας και της πίεσης στους

φυσικούς πόρους και την επισιτιστική επάρκεια λόγω ανταγωνισμού στη χρήση γης (Cesar, et al., 2019).

Επιπλέον, τα συστήματα ύδρευσης καταναλώνουν σημαντικές ποσότητες ενέργειας για την άντληση, επεξεργασία και διανομή του νερού. Αντίστοιχα, η παραγωγή τροφίμων εξαρτάται από την ενέργεια για τον μηχανολογικό εξοπλισμό, την παραγωγή λιπασμάτων, την άρδευση, καθώς και τη μεταποίηση και μεταφορά των προϊόντων (Genevieve Bennett, et al., 2016).

Η σχέση μεταξύ νερού-ενέργειας-τροφίμων εκφράζεται και σε άλλες κρίσιμες πτυχές: η εκσυγχρονισμένη άρδευση αυξάνει την κατανάλωση ενέργειας και νερού, με στόχο υψηλότερη παραγωγή τροφίμων, ενώ οι πολιτικές επιδοτήσεων ηλεκτρικής ενέργειας (π.χ. μέσω μειωμένων τιμολογίων) ενισχύουν την υπεράντληση υπόγειων υδάτων με ενδεχόμενο αρνητικό αντίκτυπο στις αποδόσεις των καλλιεργειών.

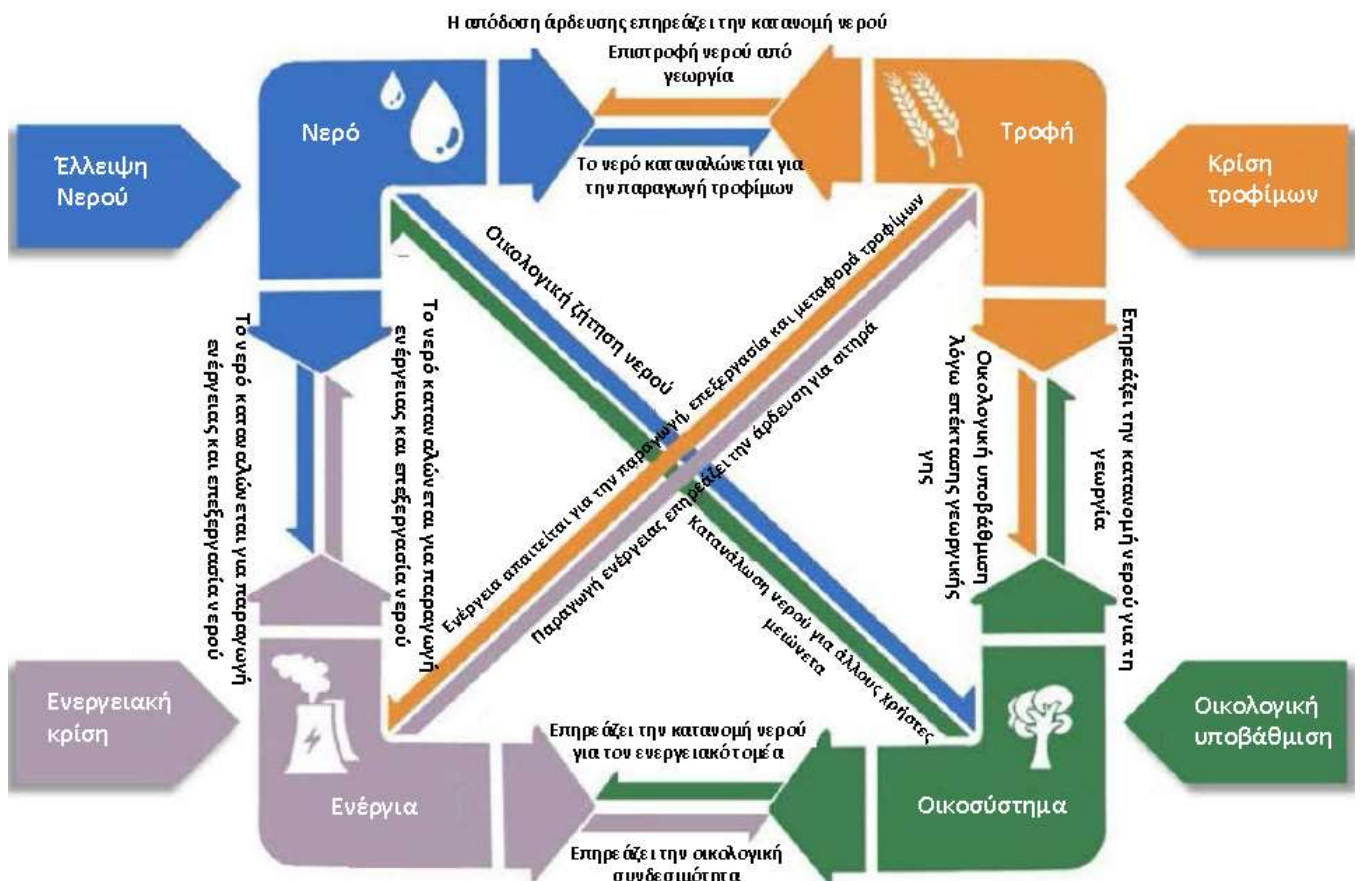
Ιδιαίτερη μορφή αποκτά το πλέγμα στις αστικές περιοχές, δεδομένου ότι το 80% του πληθυσμού σε πόλεις, πολλές από τις οποίες (μεγαλουπόλεις) δεν διαθέτουν πλήρη κάλυψη σε ύδρευση και αποχέτευση. Η παροχή τροφίμων και ενέργειας στις πόλεις αποτελεί επιπλέον πρόκληση. Η εφαρμογή της προσέγγισης Nexus σε αστικό περιβάλλον θα μπορούσε να αποφέρει σημαντικές συνέργειες και οφέλη σε επίπεδο βιώσιμης ανάπτυξης (Cesar, et al., 2019).

Η κλιματική αλλαγή εντείνει τις προκλήσεις αυτές, εισάγοντας πρόσθετες αβεβαιότητες, όπως η αύξηση της συχνότητας ακραίων καιρικών φαινομένων, οι πλημμύρες και οι ξηρασίες, που μειώνουν τη διαθεσιμότητα γλυκού νερού και επηρεάζουν αρνητικά την αγροτική παραγωγή. Μεταβολές στις βροχοπτώσεις, τις θερμοκρασίες και την ηλιακή ακτινοβολία ενδέχεται να αυξήσουν τη ζήτηση νερού για συγκεκριμένες καλλιέργειες, επιβαρύνοντας περαιτέρω τη διαχείριση των φυσικών πόρων (Genevieve Bennett, et al., 2016).

Στην εικόνα 8 παρουσιάζεται διαγραμματικά η αλληλεξάρτηση κάθε κλάδου του πλέγματος, με αναφορά στους κύριους λόγους συσχέτισής τους. Όπως φαίνεται, το νερό αποτελεί θεμελιώδη πόρο τόσο για την παραγωγή τροφίμων όσο και για την παραγωγή ενέργειας. Στον αγροτικό τομέα, η αποδοτικότητα των συστημάτων άρδευσης διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στην κατανομή των υδατικών πόρων, με σημαντικές ποσότητες να επιστρέφουν στο περιβάλλον μέσω φυσικών ή τεχνικών διεργασιών. Ωστόσο, η υπερβολική κατανάλωση νερού για γεωργικούς σκοπούς μειώνει σημαντικά τη διαθεσιμότητά του για άλλες κρίσιμες χρήσεις, όπως είναι η παραγωγή ενέργειας και η κάλυψη των αστικών αναγκών.

Παράλληλα, το νερό χρησιμοποιείται εκτεταμένα και στην ενεργειακή αλυσίδα, ιδίως για την άντληση, την επεξεργασία και την παραγωγή ενέργειας, γεγονός που ενισχύει τη δυναμική και αμφίδρομη σχέση μεταξύ των δύο τομέων. Η παραγωγή τροφίμων εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ενέργεια, η οποία απαιτείται για τις γεωργικές καλλιέργειες, τη μεταποίηση και τη μεταφορά των αγροτικών προϊόντων. Αντίστοιχα, η ίδια η ενεργειακή παραγωγή επηρεάζει τη διαθεσιμότητα υδάτινων πόρων, ιδιαίτερα στην περίπτωση των βιοκαυσίμων, όπου οι αρδευόμενες καλλιέργειες ανταγωνίζονται με άλλες χρήσεις νερού. Η αλληλεπίδραση αυτή εντείνει την πίεση στους υδάτινους πόρους, περιορίζοντας τη διαθέσιμη ποσότητα για οικολογικές ανάγκες ή για άλλες ανθρώπινες δραστηριότητες.

Τα οικοσυστήματα, τέλος, επηρεάζονται άμεσα από τις ανθρώπινες δραστηριότητες. Η τροποποίηση της φυσικής ροής των υδάτων διαταράσσει την οικολογική ισορροπία, επηρεάζοντας αρνητικά τη βιοποικιλότητα και τη συνδεσιμότητα των οικολογικών συστημάτων. Επιπλέον, η επέκταση των γεωργικών δραστηριοτήτων συχνά συνοδεύεται από αποψίλωση δασών και απώλεια φυσικών οικοτόπων (Ma, et al., 2024).



**Εικόνα 7** Η σχέση νερού-ενέργειας-τροφίμων-οικοσυστημάτων (πλέγμα WEFE). Προσαρμογή από το διάγραμμα του (Ma, et al., 2024)

Για παράδειγμα, η αυξανόμενη παγκόσμια ζήτηση για ενέργεια, νερό και τρόφιμα αναμένεται να ξεπεράσει την προσφορά έως το 2030, με ελλείψεις που εκτιμώνται από 32% στην ενέργεια έως και 249% στην καλλιεργήσιμη γη. Η κάλυψη αυτής της ζήτησης απαιτεί επενδύσεις σε υποδομές, ανθρώπινο δυναμικό και φυσικούς πόρους, οι οποίοι όμως βρίσκονται σε φθίνουσα διαθεσιμότητα. Οι περιορισμοί αυτοί ενδέχεται να επιδεινώσουν τις συγκρούσεις για τη χρήση των πόρων και να αυξήσουν την πίεση στο περιβάλλον (Genevieve Bennett, et al., 2016). Πιο συγκεκριμένα, η ζήτηση για νερό έχει ήδη διπλασιαστεί σε σχέση με τον ρυθμό αύξησης του πληθυσμού, ωστόσο σχεδόν το 30% του παγκόσμιου πληθυσμού εξακολουθεί να μην έχει πρόσβαση σε καθαρό νερό. Μέχρι το 2030, το 40% του παγκόσμιου πληθυσμού θα αντιμετωπίζει σοβαρή λειψυδρία. Αυτή η ανισορροπία αναμένεται να οδηγήσει σε εκτοπισμό σχεδόν 700 εκατομμυρίων ανθρώπων λόγω έντονης έλλειψης νερού. Η ζήτηση για νερό εκτιμάται ότι θα αυξηθεί κατά σχεδόν 55% έως το 2050, επιδεινώνοντας περαιτέρω την ανασφάλεια ενός ήδη εξαντλημένου και υποβαθμισμένου πόρου.

Παρομοίως, ο αριθμός των ανθρώπων που αντιμετωπίζουν επισιτιστική ανασφάλεια αυξήθηκε από 785 εκατομμύρια το 2015 σε 822 εκατομμύρια το 2018, καθώς η παραγωγή τροφίμων κατέστη πιο υδροβόρα και ενεργοβόρα. Η μηχανοποίηση της γεωργίας, η εντατικοποίηση των καλλιεργειών και η αυξημένη χρήση αγροχημικών σε εκτεταμένες αρδευόμενες εκτάσεις έχουν συμβάλλει στη σημαντική αύξηση της κατανάλωσης νερού και ενέργειας στον αγροτικό τομέα. Ως αποτέλεσμα, περισσότερο από το 30% της παγκόσμιας ενεργειακής κατανάλωσης και πάνω από το 70% των συνολικών απολήψεων γλυκού νερού χρησιμοποιούνται στην αλυσίδα αξίας της γεωργίας (Luxon Nhamo, et al., 2025).

Την ίδια στιγμή, σχεδόν ένα δισεκατομμύριο άνθρωποι δεν έχουν πρόσβαση σε ηλεκτρική ενέργεια, κατά μέσο όρο, απαιτούνται περίπου 0,6–4 kWh για την παραγωγή και επεξεργασία 1m<sup>3</sup> καταναλωθέντος νερού, ενώ περίπου το 30% της παγκόσμιας ενέργειας καταναλώνεται στην παραγωγή τροφίμων (Carvalho, et al., 2022), ενώ η παγκόσμια ζήτηση για ενέργεια αναμένεται να αυξηθεί κατά 25% έως το 2040, επιδεινώνοντας την ενεργειακή ανασφάλεια. Καθώς ο γεωργικός τομέας βρίσκεται υπό πίεση για να καλύψει τη συνεχώς αυξανόμενη ζήτηση τροφίμων από έναν αυξανόμενο πληθυσμό, υπάρχει επίσης πίεση για βελτίωση της αποδοτικότητας στη χρήση νερού και ενέργειας στον τομέα (Luxon Nhamo, et al., 2025).

Η διαχείριση αυτών των προκλήσεων καθίσταται ιδιαίτερα σύνθετη λόγω της πολυπλοκότητας των αλληλεπιδράσεων μεταξύ των τομέων και της έλλειψης συντονισμένης πολιτικής. Η αλληλεξάρτηση των συστημάτων αυτών συνεπάγεται την εμφάνιση συστημικών κινδύνων, καθώς η διατάραξη ενός εκ των τεσσάρων βασικών πόρων—νερού, ενέργειας, τροφίμων και οικοσυστημάτων—ενδέχεται να προκαλέσει αλυσιδωτές επιπτώσεις και στους υπόλοιπους, επηρεάζοντας τη συνολική βιωσιμότητα και ανθεκτικότητα του συστήματος (Biedler, 2019). Συνολικά, η πολυπλοκότητα του πλέγματος WEFΕ απαιτεί μια ολιστική προσέγγιση για την αποτελεσματική διαχείριση των πόρων και τη διασφάλιση βιώσιμης ανάπτυξης, λαμβάνοντας υπόψη τις αλληλεπιδράσεις και τους συμβιβασμούς μεταξύ των τριών τομέων (Genevieve Bennett, et al., 2016).

Σημαντικό είναι να αναγνωρίσουμε την αλληλεξάρτηση που έχουν μεταξύ τους αυτοί οι πόροι και πως μπορεί να αυξηθεί η συνεργασία και η παραγωγικότητα όλου του πλέγματος χωρίς την επιβάρυνση του περιβάλλοντος, ενώ παράλληλα πως μπορεί να ενσωματωθεί με οικονομικό τρόπο στη κοινωνία (Biedler, 2019).

## 5. Η συσχέτιση των NBS με το πλέγμα WEFE

### 5.1 Εισαγωγή

Η αύξηση του παγκόσμιου πληθυσμού αυξάνει δραματικά τις ανάγκες για νερό, ενέργεια και τρόφιμα, τρεις ζωτικής σημασίας πόρους για την επιβίωση και την ευημερία της ανθρωπότητας. Οι προβλεπόμενες επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής θα επιδεινώσουν τη διαθεσιμότητα νερού, καθώς και τους κινδύνους πλημμυρών, ιδιαίτερα στις αστικές περιοχές. Τα NBS έχουν αναγνωρισθεί ως βασικές έννοιες για την εκτόνωση των προβλημάτων στο πλέγμα WEFE λόγω των πολλαπλών τους ωφελειών.

Τα NBS αποτελούνται από παραγωγικά και διασυνδεδεμένα υποσυστήματα που μπορούν να εξοικονομήσουν ενέργεια, να παράγουν τρόφιμα και να διαχειρίζονται τους υδάτινους πόρους με ιδιαίτερα αποδοτικό τρόπο. Τα τελευταία χρόνια, ιδιαίτερη προσοχή έχει δοθεί στις Οικοσυστημικές Προσεγγίσεις (EbA), που περιλαμβάνουν ένα ευρύ φάσμα δραστηριοτήτων διαχείρισης οικοσυστημάτων, με τις φυσικές λύσεις ή NBS να αποκτούν ολοένα και μεγαλύτερη σημασία. Σύμφωνα με τη Διεθνή Ένωση για τη Διατήρηση της Φύσης (IUCN), τα NBS ορίζονται ως «δράσεις για την προστασία, την αειφόρο διαχείριση και την αποκατάσταση φυσικών ή τροποποιημένων οικοσυστημάτων, που αντιμετωπίζουν αποτελεσματικά και προσαρμοστικά κοινωνικές προκλήσεις, παρέχοντας ταυτόχρονα οφέλη για την ανθρώπινη ευημερία και τη βιοποικιλότητα». Τα NBS μπορούν να προσφέρουν μια σειρά από οφέλη που σχετίζονται με τις υπηρεσίες του πλέγματος WEFE και να συμβάλλουν στην αντιμετώπιση των σχετικών προκλήσεων, προωθώντας τη βιώσιμη χρήση και διαχείριση των φυσικών πόρων, μειώνοντας τους κινδύνους από φυσικές καταστροφές και ενισχύοντας την ανθεκτικότητα στην κλιματική αλλαγή.

Η διαχείριση του πλέγματος WEFE συχνά θεωρείται ένα σύνθετο πρόβλημα, το οποίο μπορεί να αντιμετωπιστεί και να διαχειριστεί με πολλούς τρόπους και διαφορετικές προσεγγίσεις. Αυτό συνεπάγεται την εξέταση ενός ευρέος φάσματος τεχνικών λύσεων (Mishr, 2022-2023).

Το πλέγμα WEFE αφορά την κατανάλωση των πόρων των οικοσυστημάτων, δηλαδή το νερό, την ενέργεια, τα τρόφιμα, τη γη και το έδαφος, καθώς και τους κοινωνικοοικονομικούς παράγοντες. Συγκεκριμένα, περιγράφει την αλληλεπίδραση της εκμετάλλευσης πόρων μεταξύ των τριών βασικών στοιχείων (Νερό, Ενέργεια και Τρόφιμα) για την ανθρώπινη κοινωνία παράλληλα προστατεύοντας το οικοσύστημα (Carvalho, et al., 2022).

Υπάρχουν διάφοροι τύποι NBS, όπως οι πράσινες, γαλάζιες και υβριδικές υποδομές. Οι πράσινες υποδομές περιλαμβάνουν δράσεις όπως η αναδάσωση, η αναβλάστηση και η δημιουργία πράσινων χώρων στις αστικές περιοχές. Οι γαλάζιες υποδομές αφορούν την αποκατάσταση και ενίσχυση υγροτόπων, ποταμών και άλλων υδάτινων οικοσυστημάτων. Οι υβριδικές υποδομές συνδυάζουν πράσινες και γαλάζιες υποδομές για την παροχή πολλαπλών οφελών (Mishr, 2022-2023).

Η συσχέτιση του νερού με κάθε τύπο NBS έχει αναλυθεί εκτενώς στα προηγούμενα κεφάλαια. Στο παρόν κεφάλαιο περιγράφεται η διασύνδεση του πλέγματος WEFE με τους τύπους NBS που εξετάστηκαν προηγουμένως.

Στον πίνακα 20 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά όλα τα NBS που αναλύθηκαν, μαζί με τον τύπο νερού που επεξεργάζονται και τη συσχέτισή τους με κάθε τομέα του πλέγματος. Όπως διαπιστώνεται, όλα τα NBS προσφέρουν οφέλη στο πλαίσιο του πλέγματος WEFE, ανεξαρτήτως του είδους νερού που μπορούν να διαχειριστούν ή επεξεργαστούν.

**Πίνακας 20** Λύσεις που βασίζονται στη φύση και η συσχέτισή τους με το πλέγμα Νερού-Ενέργειας-Τροφίμων (WEFE)

WEFE Nexus	Νερό				Ενέργεια	Τροφή	Οικοσύστημα
	Βρόχινο Νερό	Απορροή Όμβριων Υδάτων	Γκρίζο Νερό	Μαύρο Νερό			
<b>Πράσινες στέγες</b>	X	X	X		X	X	X
<b>Συστήματα συλλογής όμβριων υδάτων</b>	X	X			X	X	X
<b>Πράσινοι τοίχοι</b>	X	X	X		X	X	X
<b>Τεχνητοί υγροβιότοποι</b>	X	X	X	X	X	X	X
<b>Συστήματα Βιοκατακράτησης</b>	X	X			X	X	X
<b>Κήπος Βροχής</b>	X	X			X	X	X

Στο επόμενο κεφάλαιο θα παρουσιαστεί αναλυτικά η σχέση κάθε τύπου NBS με καθέναν από τους τομείς του πλέγματος, προκειμένου να αναδειχθούν οι δυνατότητες και οι περιορισμοί τους για την διαχείριση και επεξεργασία του νερού.

## 5.2 Πράσινες στέγες και η συσχέτιση τους με το πλέγμα Νερό- Ενέργεια- Τροφή- Οικοσύστημα

Για την αντιμετώπιση των επιπτώσεων της αστικοποίησης και τη διασφάλιση της βιώσιμης αστικής ανάπτυξης, οι πράσινες στέγες μπορούν να αξιοποιηθούν μέσω της ανάλυσης του πλέγματος WEFE. Συνήθως, οι πράσινες στέγες μελετώνται μεμονωμένα ως προς τον αντίκτυπό τους στον τομέα του νερού, μέσω της μείωσης των πλημμυρών και της αποθήκευσης όμβριων υδάτων, ή της ενέργειας, μέσω της βελτίωσης της θερμομόνωσης των κτιρίων. Ωστόσο, τα οφέλη τους είναι πολυδιάστατα, καθώς συμβάλλουν στη διαχείριση του νερού, την εξοικονόμηση ενέργειας, την αστική γεωργία και την ενίσχυση της βιοποικιλότητας. Το πλήρες δυναμικό τους μπορεί να γίνει κατανοητό μόνο μέσω μιας ολοκληρωμένης προσέγγισης WEFE.

Οι πολυστρωματικές πράσινες στέγες προσφέρουν πολλαπλά οφέλη: συμβάλλουν στη μείωση των πλημμυρών, τη συλλογή και βελτίωση της ποιότητας του νερού, την εξοικονόμηση ενέργειας μέσω της θερμομόνωσης, την προώθηση της αστικής γεωργίας και την ενίσχυση της βιοποικιλότητας. Επιπλέον, η αλληλεπίδραση μεταξύ αυτών των παραμέτρων ενισχύει τη συνολική τους αποτελεσματικότητα. Για παράδειγμα, το συλλεγόμενο νερό μπορεί να χρησιμοποιηθεί για άρδευση, ενισχύοντας τη σύνδεση μεταξύ νερού και τροφίμων.

Ανάλογα με τις κλιματικές συνθήκες, οι πράσινες στέγες μπορούν να συγκρατήσουν από 40% έως 80% της ετήσιας απορροής, μειώνοντας τον κίνδυνο πλημμυρών, ακόμη και σε μεσογειακές περιοχές. Οι δεξαμενές όμβριων υδάτων επιτρέπουν την αποθήκευση μεγάλων ποσοτήτων νερού, το οποίο, μετά από κατάλληλη επεξεργασία, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για οικιακές μη πόσιμες χρήσεις, όπως η άρδευση και η χρήση σε τουαλέτες. Ωστόσο, οι μεγάλες δεξαμενές απαιτούν χώρο, ο οποίος δεν είναι πάντα διαθέσιμος στις πόλεις. Αντίθετα, οι πολυεπίπεδες πράσινες στέγες αξιοποιούν τον χώρο κάτω από τη στέγη για τη συλλογή νερού, ενισχύοντας τη διαχείριση των υδάτων στις αστικές περιοχές.

Η κλιματική αλλαγή αναμένεται να αυξήσει τη συχνότητα των έντονων βροχοπτώσεων, εναλλασσόμενων με περιόδους ξηρασίας. Παράλληλα, η αυξανόμενη αστικοποίηση καθιστά επιτακτική την ανάπτυξη λύσεων που βελτιώνουν τη διαχείριση του νερού με βιώσιμο τρόπο. Οι πολυεπίπεδες πράσινες στέγες, συνδυάζοντας τη χωρητικότητα των δεξαμενών με τη συγκράτηση του νερού, αποτελούν μια καινοτόμο λύση για την αντιμετώπιση αυτών των προκλήσεων.

Η ενεργειακή ζήτηση αυξάνεται διαρκώς λόγω της ταχείας αστικοποίησης και οικονομικής ανάπτυξης. Για να περιοριστεί η περιβαλλοντική επιβάρυνση, είναι απαραίτητη η αξιοποίηση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και η ανάπτυξη συστημάτων εξοικονόμησης ενέργειας. Οι πράσινες στέγες διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων, μειώνοντας την ηλιακή ακτινοβολία, διατηρώντας σταθερή τη θερμοκρασία και επιτρέποντας εξοικονόμηση ενέργειας. Επιπλέον, η αποθήκευση νερού σε υψηλά επίπεδα μπορεί να αξιοποιηθεί για την παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας μέσω μικρών τουρμπίνων.

Παράλληλα, η μείωση των διαθέσιμων εκτάσεων για γεωργία και η αυξημένη ζήτηση τροφίμων καθιστούν την αστική γεωργία μια σημαντική λύση. Οι πράσινες στέγες μπορούν να αξιοποιηθούν για την καλλιέργεια λαχανικών, περιορίζοντας την ανάγκη για αρόσιμη γη και

μειώνοντας τον κίνδυνο μόλυνσης από ρύπους. Ωστόσο, η ανάπτυξη καλλιεργειών εξαρτάται από το πάχος του εδάφους, την υποστηρικτική ικανότητα των στεγών και τη διαχείριση των θρεπτικών στοιχείων. Ορισμένα λαχανικά με ρηχές ρίζες, όπως το μαρούλι και το λάχανο, έχουν αποδειχθεί ιδιαίτερα παραγωγικά σε πράσινες στέγες.

Επιπλέον, οι πράσινες στέγες βελτιώνουν την ποιότητα του αέρα, δεσμεύοντας το CO<sub>2</sub> και αναβαθμίζοντας αισθητικά το αστικό περιβάλλον. Συμβάλλουν στη διατήρηση της βιοποικιλότητας, δημιουργώντας βιότοπους για έντομα και πουλιά, ενώ η χρήση αυτοφυούς βλάστησης βελτιώνει τη διατήρηση της υγρασίας. Παρόλο που λίγες μελέτες έχουν επικεντρωθεί αποκλειστικά στη μείωση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης μέσω των πράσινων στεγών, η δυναμική τους είναι εμφανής.

Τέλος, οι πράσινες στέγες μπορούν να αξιοποιηθούν και σε εκπαιδευτικό πλαίσιο, δίνοντας στα παιδιά την ευκαιρία να γνωρίσουν τη γεωργία και τη σημασία των φυσικών οικοσυστημάτων στο αστικό περιβάλλον. Πολλές πόλεις διεθνώς ενθαρρύνουν την υιοθέτηση πράσινων στεγών ως εργαλείο βιώσιμης αστικής ανάπτυξης, αναδεικνύοντας τον ρόλο τους στη βελτίωση της ποιότητας ζωής και της περιβαλλοντικής ανθεκτικότητας των πόλεων (Cristiano, et al., 2021).

Στον πίνακα 21 καταγράφεται η επίδραση που έχουν οι πράσινες στέγες σε κάθε τομέα του πλέγματος WEFΕ, βάσει της προηγούμενης ανάλυσης.

Είναι εμφανές ότι οι πράσινες στέγες συμβάλλουν θετικά σε όλους τους επιμέρους τομείς του πλέγματος, οι οποίοι αλληλοσυνδέονται λειτουργικά και συστημικά. Η πολλαπλή αυτή συμβολή ενισχύει τη βιωσιμότητα των πράσινων στεγών ως λύση βασισμένη στη φύση, με σαφή οφέλη για την ολοκληρωμένη διαχείριση φυσικών πόρων στις αστικές περιοχές.

**Πίνακας 21** Πράσινες στέγες και η επιρροή τους στο πλέγμα WEFΕ

Νερό	Ενέργεια	Τροφή	Οικοσύστημα
Μείωση πλημμυρών	Θερμομόνωση	Άρδευση	Ενίσχυση βιοποικιλότητας
Αποθήκευση όμβριων υδάτων	Παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας	Καλλιέργεια τροφίμων	Μείωση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης
Επαναχρησιμοποίηση Νερού	Διατήρηση της υγρασίας		Αισθητική

### 5.3 Συστήματα συλλογής όμβριων υδάτων και η συσχέτιση τους με το πλέγμα WEFE

Η έλλειψη νερού και ενέργειας για άρδευση αποτελούν τους βασικούς παράγοντες που οδηγούν στη σχετικά εκτεταμένη, χαμηλής απόδοσης και ευάλωτη στην κλιματική αλλαγή γεωργία σε ημι-άνυδρες περιοχές. Βάση της μελέτης του (Ye, et al., 2023) που αναφέρεται στον σχεδιασμό ενός συστήματος συλλογής όμβριων υδάτων μέσω φωτοβολταϊκών πάνελ (Photovoltaic Panel Rainwater Harvesting - PVRH), το οποίο συνδυάζει την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω φωτοβολταϊκών (PV) με τη συλλογή βρόχινου νερού, αποσκοπεί στην ανάπτυξη νέων υδάτινων πόρων και καθαρής ενεργειακής παροχής για τη γεωργική παραγωγή, επιτυγχάνοντας την σύνδεση με το πλέγμα του WEF nexus (νερό, ενέργεια, τροφή). Οι ημι-άνυδρες περιοχές χαρακτηρίζονται από χαμηλά επίπεδα βροχοπτώσεων, έντονη εξάτμιση και περιορισμένη επιφανειακή απορροή, γεγονός που δυσχεραίνει τη συλλογή και αποθήκευση όμβριων υδάτων. Στις τοπικές αγροτικές κοινότητες, διάφορες εγκαταστάσεις, όπως οι δρόμοι, στέγες, δεξαμενές συλλογής και λιμνοδεξαμενές, αξιοποιούνται για την αποθήκευση νερού με σκοπό τη γεωργική παραγωγή και την καθημερινή χρήση. Επιπλέον, το RWHS βοηθά στη βελτίωση των υδρολογικών συνθηκών, μειώνοντας τις πλημμύρες και τη ρύπανση από την υπερχειλίση των αστικών αποχετευτικών συστημάτων. Η συλλογή βρόχινου νερού συμβάλλει στην ενίσχυση της τοπικής αποστράγγισης, ενώ μειώνει τη ροή του επιφανειακού νερού, βοηθώντας στην αποφυγή της διάβρωσης του εδάφους και της απορροής ρύπων. Αυτό έχει θετικές επιπτώσεις στην ποιότητα του νερού και τη βιωσιμότητα των υδάτινων οικοσυστημάτων.

Τα φωτοβολταϊκά πάνελ διαθέτουν εκτεταμένη επιφάνεια συλλογής, μηδενική διήθηση και υψηλό ποσοστό αποθήκευσης, καθιστώντας τα ιδανικά για τη συλλογή βρόχινου νερού σε ημι-άνυδρες περιοχές. Στο αγροτικό οικοσύστημα, οι διασυνδέσεις του WEF nexus αντικατοπτρίζουν τη δυναμική αλληλεπίδραση μεταξύ των υδάτινων και ενεργειακών πόρων, καθώς και την άμεση σύνδεσή τους με την καλλιεργήσιμη γη και την παραγωγή. Ο μηχανισμός λειτουργίας του συστήματος PVRH ενσωματώνει τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και τη συλλογή βρόχινου νερού, ενισχύοντας τη βιωσιμότητα της γεωργίας, ιδιαίτερα σε ημι-άνυδρες περιοχές. Η βασική αρχή λειτουργίας του περιλαμβάνει τη χρήση των φωτοβολταϊκών πάνελ για την παραγωγή ενέργειας κατά τη διάρκεια των ηλιόλουστων ημερών, καθώς και την αξιοποίηση των βροχοπτώσεων για την άρδευση των καλλιεργειών κατά τις ξηρές περιόδους, μειώνοντας έτσι την εξάρτηση από εξωτερικές πηγές ενέργειας και νερού.

Το σύστημα PVRH ενσωματώνει τα τρία βασικά στοιχεία του WEF nexus (νερό, ενέργεια, τροφή) και δημιουργεί μια αλληλοσυμπληρούμενη και αποδοτική διασύνδεση πόρων, συμβάλλοντας στην ενίσχυση της γεωργικής παραγωγής. Με αυτόν τον τρόπο, αντιμετωπίζονται κρίσιμα προβλήματα, όπως η έλλειψη νερού και ενέργειας, τα οποία αποτελούν καθοριστικούς παράγοντες για τη γεωργία σε ημι-άνυδρες περιοχές. Το σύστημα αξιοποιεί τα φωτοβολταϊκά πάνελ τόσο για τη συλλογή και αποθήκευση βρόχινου νερού προς άρδευση όσο και για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την υποστήριξη γεωργικών δραστηριοτήτων, όπως η λειτουργία αντλιών ή άλλων ενεργειακών εφαρμογών. Αυτή η διττή χρήση του συστήματος μειώνει την εξάρτηση από τις παραδοσιακές πηγές νερού,

όπως τα υπόγεια ύδατα, και βελτιστοποιεί τη διαχείριση των υδάτινων πόρων, συμβάλλοντας στην αύξηση της αποδοτικότητας της γεωργίας.

Η εφαρμογή του PVRH οδηγεί σε μεγαλύτερη αποδοτικότητα και βιωσιμότητα των καλλιεργειών, μειώνοντας την ανάγκη για δαπανηρές και μη βιώσιμες γεωργικές πρακτικές. Μέσω της ορθολογικής διαχείρισης των υδάτινων και ενεργειακών πόρων, οι αγρότες μπορούν να επεκτείνουν την καλλιέργεια προϊόντων με υψηλή οικονομική και διατροφική αξία, όπως τα λαχανικά, ενισχύοντας τόσο τη διατροφική ασφάλεια όσο και το αγροτικό εισόδημα. Παράλληλα, η χρήση του βρόχινου νερού μειώνει την ανάγκη άντλησης από υπόγεια και επιφανειακά ύδατα, εξασφαλίζοντας μια πιο βιώσιμη πηγή άρδευσης. Η αποθήκευση του νερού προσφέρει αυξημένη ανθεκτικότητα στις περιόδους ξηρασίας, ενώ η ενεργειακή αυτονομία του συστήματος συμβάλλει στη μείωση της χρήσης ορυκτών καυσίμων και του ενεργειακού αποτυπώματος της γεωργίας.

Τέλος, το RWHS ενισχύει τη βιοποικιλότητα, καθώς τα συστήματα αυτά μπορούν να υποστηρίξουν την ανάπτυξη φυτών και άλλων οργανισμών σε περιοχές με περιορισμένη πρόσβαση σε νερό, προάγοντας τη φύση στις αστικές περιοχές. Συνολικά, το σύστημα συλλογής βρόχινου νερού συμβάλλει στην αναβάθμιση του οικοσυστήματος, προάγοντας τη βιώσιμη χρήση των φυσικών πόρων και ενισχύοντας την ανθεκτικότητα των αστικών περιοχών στην κλιματική αλλαγή (Silva, et al., 2022)

Συνολικά, το σύστημα PVRH συνιστά μια καινοτόμο και βιώσιμη προσέγγιση, η οποία ενσωματώνει αποτελεσματικά το WEF nexus, αντιμετωπίζοντας ταυτόχρονα τις προκλήσεις που σχετίζονται με τη διαθεσιμότητα νερού και ενέργειας. Μέσω της εφαρμογής του, ενισχύεται η αγροτική παραγωγή και προάγεται η βιώσιμη γεωργία στις ημι-άνυδρες περιοχές, παρέχοντας μια ολοκληρωμένη λύση για την αειφόρο διαχείριση των φυσικών πόρων (Ye, et al., 2023).

Στον πίνακα 22 παρουσιάζεται η επίδραση που έχουν τα συστήματα συλλογής όμβριων υδάτων σε κάθε τομέα του πλέγματος WEF, βάσει της προηγούμενης ανάλυσης.

Είναι εμφανές ότι τα εν λόγω συστήματα, ιδίως όταν συνδυάζονται με τεχνολογίες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως φωτοβολταϊκά όπως τα PVRH ή άλλες τεχνολογικές λύσεις, συμβάλλουν ουσιαστικά σε όλους τους επιμέρους τομείς του πλέγματος, οι οποίοι λειτουργούν αλληλένδετα. Η πολλαπλή αυτή συνεισφορά ενισχύει τη βιωσιμότητα και την αποδοτικότητα των συστημάτων συλλογής όμβριων υδάτων ως NBS, προσφέροντας σημαντικά οφέλη για την ολοκληρωμένη διαχείριση των φυσικών πόρων στο αστικό περιβάλλον.

**Πίνακας 22** Συστήματα συλλογής όμβριων υδάτων και η επιρροή τους στο πλέγμα WEFE

Νερό	Ενέργεια	Τροφή	Οικοσύστημα
Μείωση πλημμυρών	Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω φωτοβολταϊκών	Άρδευση	Ενίσχυση βιοποικιλότητας
Αποθήκευση όμβριων υδάτων		Καλλιέργεια τροφίμων	Μείωση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης
Επαναχρησιμοποίηση Νερού			

## 5.4 Πράσινοι τοίχοι και η συσχέτιση τους με το πλέγμα Νερό- Ενέργεια- Τροφή- Οικοσύστημα

Τα συστήματα πράσινων τοίχων αποτελούν μια βιώσιμη και καινοτόμο μέθοδο για τον σχεδιασμό και την ανάπτυξη αστικών πράσινων χώρων, συμβάλλοντας στη διαμόρφωση πιο βιώσιμων πόλεων. Επιπλέον, αυτά τα συστήματα μπορούν να αποφέρουν οικονομικά οφέλη, να βελτιώσουν την ποιότητα του αέρα, να μειώσουν το φαινόμενο της αστικής θερμικής νησίδας και να συμβάλλουν στη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης. Παράλληλα, ενισχύουν τη βιοποικιλότητα, αναβαθμίζουν τα φυσικά οικοσυστήματα, βελτιστοποιούν τη χρήση γης και συμβάλλουν στη διαχείριση των όμβριων υδάτων.

Τα συστήματα πράσινων τοίχων αποσκοπούν στην βελτιστοποίηση διαχείρισης των υδάτινων πόρων και στη διατήρηση της καθαρής ενεργειακής παροχής για τη γεωργική παραγωγή, κατά συνέπεια επιτυγχάνοντας την εκτόνωση των προβλημάτων στο πλέγμα WEFΕ .

Η πράσινη υποδομή ενισχύει τη βιώσιμη διαχείριση των υδάτινων πόρων, συμβάλλει στη μείωση των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής και στηρίζει πρακτικές εξοικονόμησης νερού. Παράγοντες όπως η ανακύκλωση λυμάτων, η σωστή άρδευση και λίπανση είναι κρίσιμοι για τη διατήρηση της λειτουργικότητας αυτών των συστημάτων (Reyhani, et al., 2024). Οι πράσινοι τοίχοι συμβάλλουν στη ρύθμιση της απορροής των όμβριων, μειώνοντας τον κίνδυνο πλημμυρών και απορροφώντας νερό που διαφορετικά θα κατέληγε στα αποχετευτικά συστήματα (Sang, et al., 2022).

Επίσης προάγουν τη γεωργική δραστηριότητα στις πόλεις, αξιοποιώντας περιορισμένους χώρους μέσω σύγχρονων και αποδοτικών μορφών καλλιέργειας. Η δημιουργία κάθετων αγροκτημάτων μπορεί να συμβάλλει στη διατροφική ασφάλεια, ενώ η ανακύκλωση νερού και η αξιοποίηση βρόχινου νερού διευκολύνουν την παραγωγή τροφίμων με μειωμένες απαιτήσεις σε φυσικούς πόρους.

Μια πρόσφατη μελέτη ανέδειξε ότι οι πράσινοι τοίχοι μπορούν να μειώσουν την κατανάλωση ενέργειας για κλιματισμό στη Μεσογειακή ζώνη, συμβάλλοντας έτσι στην εξισορρόπηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Επιπλέον, η επιλογή κατάλληλων υλικών στην παραγωγή και κατασκευή αυτών των συστημάτων ενισχύει την ενεργειακή αποδοτικότητα και μειώνει τις συνολικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Μελέτη στο Χονγκ Κονγκ έδειξε ότι η χρήση εξωτερικού πράσινου τοίχου μπορεί να οδηγήσει σε εξοικονόμηση ενέργειας έως 16% σε χρονικό ορίζοντα 50 ετών (Reyhani, et al., 2024).

Ένα ακόμα πλεονέκτημα, είναι ότι μπορούν να μειώσουν τη θερμοκρασία, βελτιώνοντας το αστικό μικροκλίμα, και να λειτουργήσουν ως φυσικά φίλτρα ρύπων. Παράλληλα, συνεισφέρουν στην ηχομόνωση και στη μείωση της ηχορύπανσης, προσφέροντας παράλληλα ένα καταφύγιο για είδη της τοπικής πανίδας, όπως πτηνά. Η παρουσία πράσινων υποδομών στις πόλεις σχετίζεται με τη μείωση της θνησιμότητας από καρδιαγγειακές παθήσεις και ψυχικές διαταραχές, ιδιαίτερα σε περιβάλλοντα με αυξημένες θερμοκρασίες λόγω της αστικής θερμικής νησίδας. Επιπλέον, βελτιώνουν την ποιότητα του αέρα, μειώνοντας τους ατμοσφαιρικούς ρύπους που επηρεάζουν την ανθρώπινη υγεία. Ωστόσο, οι αρνητικές επιπτώσεις, όπως η πιθανή μόλυνση εδώδιμων φυτών ή η παρουσία αλλεργιογόνων ειδών,

πρέπει να λαμβάνονται υπόψη στον σχεδιασμό τους (Sang, et al., 2022). Η εγκατάσταση πράσινων τοίχων συμβάλλει στην αναβάθμιση των φυσικών οικοσυστημάτων, καθώς ενισχύει τη βιοποικιλότητα, δημιουργεί νέους βιότοπους για φυτά και ζώα και μειώνει τη μόλυνση του αέρα. Επίσης, βελτιώνει τη θερμική άνεση των πόλεων, μειώνοντας τις επιπτώσεις της αστικής θερμικής νησίδας.

Πέρα από τα περιβαλλοντικά οφέλη, τα συστήματα πράσινων τοίχων ενισχύουν την κοινωνική συνοχή και βελτιώνουν την σωματική και ψυχική υγεία των πολιτών. Συνολικά, η χρήση αυτών των συστημάτων μπορεί να συμβάλλει στη δημιουργία ανθεκτικότερων και πιο βιώσιμων πόλεων (Reyhani, et al., 2024).

Ο πίνακας 23 συνοψίζει την επίδραση που έχουν οι πράσινοι τοίχοι σε κάθε τομέα του πλέγματος WEFΕ, βάσει της προηγούμενης ανάλυσης.

Είναι σαφές ότι οι πράσινοι τοίχοι, ιδίως όταν συνδυάζονται με την κατάλληλη φυτική βλάστηση, συμβάλλουν ουσιαστικά σε όλους τους επιμέρους τομείς του πλέγματος, οι οποίοι αλληλοεξαρτώνται και λειτουργούν ως μέρος ενός ολοκληρωμένου συστήματος. Η πολλαπλή αυτή συνεισφορά ενισχύει τόσο τη βιωσιμότητα όσο και την αποδοτικότητα των πράσινων τοίχων ως NBS, προσφέροντας σημαντικά οφέλη για την ολοκληρωμένη διαχείριση των φυσικών πόρων και την αειφορία του αστικού περιβάλλοντος.

**Πίνακας 23** Πράσινοι τοίχοι και η επιρροή τους στο πλέγμα WEFΕ

<b>Νερό</b>	<b>Ενέργεια</b>	<b>Τροφή</b>	<b>Οικοσύστημα</b>
Μείωση πλημμυρών	Θέρμανση - παραγωγή βιομάζας	Άρδευση άλλων καλλιεργειών	Ενίσχυση βιοποικιλότητας
Αποθήκευση όμβριων υδάτων	Εξοικονόμηση ενέργειας για θέρμανση/ψύξη κτιρίου	Καλλιέργεια τροφίμων	Μείωση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης
Επαναχρησιμοποίηση Νερού			Αειφορία

## 5.5 Τεχνητοί υγροβιότοποι και η συσχέτιση τους με το πλέγμα Νερό-Ενέργεια- Τροφή- Οικοσύστημα

Οι τεχνητοί υγροβιότοποι (Constructed Wetlands - CWs) αποτελούν μια φυσική, οικονομικά αποδοτική και περιβαλλοντικά φιλική λύση για την επεξεργασία λυμάτων. Συμβάλλουν σημαντικά στην ανακύκλωση του νερού και στη διαχείριση των υδάτινων πόρων, καθιστώντας το επεξεργασμένο νερό κατάλληλο για πόση ή γεωργική χρήση. Η ενσωμάτωσή τους στον αστικό υδρολογικό κύκλο βοηθά στην αντιμετώπιση των συνεπειών της κλιματικής αλλαγής και της αστικής ανάπτυξης, ενώ μπορούν επίσης να λειτουργήσουν ως συστήματα προστασίας από πλημμύρες, προσφέροντας παράλληλα οφέλη για τη γεωργία και την επισιτιστική ασφάλεια.

Οι υγρότοποι παρέχουν σημαντικές δυνατότητες παραγωγής βιομάζας, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε ως τρόφιμο είτε ως ενεργειακή πηγή. Η βιομάζα από τους υγροτόπους μπορεί να αξιοποιηθεί για ανθρώπινη κατανάλωση, ως ζωοτροφή ή ως καύσιμο για θέρμανση και παραγωγή βιοαερίου και βιοκαυσίμων. Μελέτες δείχνουν ότι, λαμβάνοντας υπόψη τις οικοσυστημικές υπηρεσίες, το κόστος παραγωγής βιομάζας μπορεί να είναι αρνητικό, γεγονός που υποδηλώνει οικονομικό όφελος από τις υπηρεσίες επεξεργασίας νερού.

Επιπλέον, η βλάστηση απορροφά θρεπτικά συστατικά και σταθεροποιεί τις εκτεθειμένες όχθες των υγροτόπων, μειώνοντας έτσι τον κίνδυνο διάβρωσης, ενώ παράλληλα αυξάνει την αντίσταση στη ροή του νερού, μειώνοντας την κινητική ενέργεια και προάγοντας την αυξημένη ιζηματογένεση (Agaton, et al., 2023). Ακόμα με την χρήση των μικροβιακών κυψελών καυσίμου (Microbial Fuel Cell - Constructed Wetlands, MFC-CW) σε συνδυασμό με τεχνητούς υγροτόπους παράγουν ηλεκτρική ενέργεια μέσω της οξειδωσης της οργανικής ύλης από μικροοργανισμούς, έχοντας μικρό ενεργειακό αποτύπωμα (Ouyang, et al., 2025).

Επιπλέον, η διαχείριση των υγροβιοτόπων μπορεί να ενισχύσει την απόδοση γεωργικών εκτάσεων, όπως οι φυτείες ζαχαροκάλαμου, μέσω βελτίωσης της αποστράγγισης των καλλιεργούμενων εκτάσεων.

Οι τεχνητοί υγροβιότοποι ενισχύουν την περιβαλλοντική αειφορία μέσω της δημιουργίας και διατήρησης οικοτόπων για την τοπική πανίδα και χλωρίδα. Παρέχουν καταφύγιο για τη βιοποικιλότητα, λειτουργώντας ως ρυθμιστικοί μηχανισμοί στο οικοσύστημα. Επιπλέον, η βλάστηση στους υγροτόπους συμβάλλει στη μείωση ρύπων, αξιοποιώντας θρεπτικά στοιχεία όπως το άζωτο και ο φώσφορος, ενώ μπορεί να αποθηκεύσει βαρέα μέταλλα μέσω φυτοεξυγίανσης. Οι οικοσυστημικές υπηρεσίες που προσφέρουν οι τεχνητοί υγρότοποι εκτιμώνται οικονομικά σε πολλές χώρες, με τη διατήρηση και αποκατάσταση φυσικών οικοτόπων να αναγνωρίζεται ως η πιο πολύτιμη λειτουργία τους (Agaton, et al., 2023).

Στον πίνακα 24 καταγράφεται η επίδραση που έχουν οι τεχνητοί υγροβιότοποι σε κάθε τομέα του πλέγματος WEFEE, βάσει της προηγούμενης ανάλυσης.

Είναι σαφές ότι οι τεχνητοί υγροβιότοποι, ιδίως όταν συνδυάζονται με την κατάλληλη τεχνολογία, συμβάλλουν ουσιαστικά σε όλους τους επιμέρους τομείς του πλέγματος, οι οποίοι λειτουργούν αλληλένδετα και συστημικά. Η πολλαπλή αυτή συνεισφορά ενισχύει τόσο τη βιωσιμότητα όσο και την αποδοτικότητα των τεχνητών υγροβιότοπων ως NBS

προσφέροντας σημαντικά οφέλη για την ολοκληρωμένη διαχείριση των φυσικών πόρων και την ενίσχυση της αειφορίας στο αστικό περιβάλλον

**Πίνακας 24** Τεχνητοί υγροβιότοποι και η επιρροή τους στο πλέγμα WEFE

Νερό	Ενέργεια	Τροφή	Οικοσύστημα
Μείωση πλημμυρών	Εξοικονόμηση πόρων και ενέργειας	Άρδευση άλλων καλλιεργειών	Ενίσχυση βιοποικιλότητας
Αποθήκευση όμβριων υδάτων	Θέρμανση παραγωγής βιομάζας	Καλλιέργεια τροφίμων	Μείωση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης
Επαναχρησιμοποίηση Νερού		Ζωοτροφή παραγωγής βιομάζας	Αειφορία

## 5.6 Συστήματα Βιοκατακράτησης και η συσχέτιση τους με το πλέγμα Νερό-Ενέργεια- Τροφή- Οικοσύστημα

Τα συστήματα βιοκράτησης συνιστούν μία σύγχρονη και αποτελεσματική στρατηγική για τη διαχείριση των όμβριων υδάτων, ιδιαίτερα σε αστικά περιβάλλοντα. Λειτουργούν συγκρατώντας, φιλτράροντας και απορροφώντας τις επιφανειακές απορροές μέσω ενός συνδυασμού βλάστησης, ειδικά διαμορφωμένων υποστρωμάτων και υπογείων δομών αποστράγγισης. Η εφαρμογή τους συμβάλλει στη βελτίωση της ποιότητας του νερού, στη ρύθμιση της ροής των υδάτων και στη μείωση της συγκέντρωσης ρύπων.

Η συμβολή των συστημάτων βιοκατακράτησης στη διαχείριση των υδάτινων πόρων είναι πολυδιάστατη, καθώς περιορίζουν την απορροή των όμβριων υδάτων και συμβάλλουν στην ανατροφοδότηση των υπόγειων υδροφορέων. Η επιλεκτική σχεδίαση και επιλογή του υποστρώματος επιτρέπουν την κατακράτηση και αποδόμηση ρύπων, όπως βαρέα μέταλλα και οργανικές ενώσεις, περιορίζοντας έτσι την επιβάρυνση των φυσικών υδάτινων αποδεκτών. Η ενσωμάτωση της βλάστησης ενισχύει τις διαδικασίες εξάτμισης και διαπνοής, συμβάλλοντας στην εξισορρόπηση του υδρολογικού κύκλου. Συνολικά, τα συστήματα βιοκατακράτησης προσφέρουν μια ολοκληρωμένη προσέγγιση στη διαχείριση των όμβριων υδάτων, με πολλαπλά οφέλη για την ποιότητα του νερού, την ενεργειακή απόδοση και την υγεία των οικοσυστημάτων (Tang, 2024)

Η λειτουργία αυτών των συστημάτων έχει επίσης ενεργειακές επιπτώσεις, καθώς μειώνει την ανάγκη για μηχανικές υποδομές διαχείρισης υδάτων, όπως αντλιοστάσια και εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων. Η αποτελεσματικότερη διαχείριση των όμβριων υδάτων συνεπάγεται περιορισμό της καταπόνησης των συμβατικών συστημάτων αποστράγγισης, οδηγώντας σε μακροπρόθεσμη εξοικονόμηση πόρων και ενέργειας. Επιπλέον, η παρουσία πράσινων υποδομών μπορεί να συμβάλλει στη μείωση του φαινομένου της αστικής θερμικής νησίδας, με έμμεσες επιδράσεις στη συνολική κατανάλωση ενέργειας για ψύξη.

Η βελτίωση της ποιότητας του νερού μπορεί να έχει θετικές συνέπειες στη γεωργία, μέσω της εξασφάλισης καθαρότερου αρδευτικού νερού. Σε ορισμένες περιπτώσεις, η ενσωμάτωση καλλιεργούμενων φυτών εντός αυτών των συστημάτων μπορεί να προσφέρει επιπλέον οφέλη, τόσο σε επίπεδο τροφικής παραγωγής όσο και στη βελτίωση της βιοποικιλότητας.

Επιπρόσθετα, η ανάπτυξη συστημάτων βιοκατακράτησης εντός αστικών περιοχών συμβάλλει σημαντικά στη διατήρηση και ενίσχυση της οικολογικής ισορροπίας. Η παρουσία άφθονης βλάστησης ενισχύει τη δημιουργία μικροοικοτόπων, υποστηρίζοντας την άγρια πανίδα και αυξάνοντας τη βιοποικιλότητα. Παράλληλα, οι φυσικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα εντός των συστημάτων αυτών συνεισφέρουν στην αποκατάσταση της γονιμότητας του εδάφους και στην πρόληψη της διάβρωσης.

Συνολικά, αυτά τα συστήματα αποτελούν μια καινοτόμο και οικολογικά βιώσιμη προσέγγιση στη διαχείριση των όμβριων υδάτων, με ευρύτερες θετικές επιπτώσεις στο υδάτινο δυναμικό, την ενεργειακή κατανάλωση, την ποιότητα του εδάφους και τη διατήρηση της βιοποικιλότητας. Η εφαρμογή τους αναμένεται να διαδραματίσει καθοριστικό ρόλο στη βιώσιμη αστική ανάπτυξη,

ενισχύοντας την ανθεκτικότητα των πόλεων στις προκλήσεις που σχετίζονται με την κλιματική αλλαγή και τη ρύπανση του περιβάλλοντος (Vijayaraghavan, et al., 2021).

Στον πίνακα 25 καταγράφεται η επίδραση που έχουν τα συστήματα βιοκρατισης σε κάθε τομέα του πλέγματος WEFEE, βάσει της προηγούμενης ανάλυσης.

Είναι σαφές ότι τα συστήματα βιοκατακράτησης, ιδιαίτερα όταν συνδυάζονται με κατάλληλες τεχνολογικές παρεμβάσεις, συμβάλλουν ουσιαστικά σε όλους τους τομείς του πλέγματος, οι οποίοι είναι στενά αλληλένδετοι και αλληλοεξαρτώμενοι. Η πολυδιάστατη αυτή συνεισφορά ενισχύει τη βιωσιμότητα και την αποδοτικότητα των συστημάτων αυτών ως NBS, προσφέροντας σημαντικά οφέλη για την ολιστική διαχείριση των φυσικών πόρων και τη στήριξη της αειφόρου ανάπτυξης στο αστικό περιβάλλον.

**Πίνακας 25** Τα συστήματα βιοκατακράτησης και η επιρροή τους στο πλέγμα WEFEE

<b>Νερό</b>	<b>Ενέργεια</b>	<b>Τροφή</b>	<b>Οικοσύστημα</b>
Μείωση πλημμυρών	Εξοικονόμηση πόρων και ενέργειας	Άρδευση	Ενίσχυση βιοποικιλότητας
Αποθήκευση όμβριων υδάτων		Καλλιέργεια τροφίμων	Μείωση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης
Επαναχρησιμοποίηση Νερού			

## 5.7 Κήποι βροχής και η συσχέτιση τους με το πλέγμα Νερό- Ενέργεια- Τροφή- Οικοσύστημα

Οι κήποι βροχής αποτελούν μια καινοτόμο και βιώσιμη λύση για τη διαχείριση των όμβριων υδάτων, προσφέροντας πολλαπλά οφέλη στο περιβάλλον και την ανθρώπινη δραστηριότητα. Ως φυσικά συστήματα διήθησης, συμβάλλουν στη ρύθμιση της ροής του νερού, μειώνοντας τον κίνδυνο πλημμυρών και βελτιώνοντας την ποιότητά του μέσω της απομάκρυνσης ρύπων. Παράλληλα, η εφαρμογή τους μπορεί να έχει θετικές επιπτώσεις στη γεωργία, εξασφαλίζοντας καθαρότερο νερό για άρδευση και ενισχύοντας τη βιωσιμότητα της παραγωγής τροφίμων. Από ενεργειακή άποψη, οι κήποι βροχής μειώνουν την ανάγκη για δαπανηρές υποδομές αποστράγγισης και επεξεργασίας υδάτων, συμβάλλοντας έτσι στην εξοικονόμηση πόρων. Επιπλέον, η παρουσία τους ενισχύει τη βιοποικιλότητα, δημιουργώντας ευνοϊκές συνθήκες για τη διατήρηση των οικοσυστημάτων και τη βελτίωση του αστικού μικροκλίματος. Ως εκ τούτου, οι κήποι βροχής αποτελούν μια πολύτιμη προσθήκη στις σύγχρονες αστικές και αγροτικές περιοχές, συνδυάζοντας περιβαλλοντικά, κοινωνικά και οικονομικά οφέλη.

Η ενσωμάτωση τέτοιων συστημάτων σε αστικά τοπία μπορεί να έχει έμμεσες επιπτώσεις στην παραγωγή τροφίμων. Η βελτίωση της ποιότητας του νερού μέσω της απομάκρυνσης ρύπων μπορεί να οδηγήσει σε καθαρότερο νερό για άρδευση, υποστηρίζοντας την αστική γεωργία και την παραγωγή τροφίμων σε τοπικό επίπεδο (Tang, 2024). Η ιδέα ενός λαχανόκηπου βροχής παρουσιάζει προοπτικές, καθώς μπορεί ταυτόχρονα να μειώσει την απορροή των όμβριων υδάτων και να υποστηρίξει την αστική παραγωγή τροφίμων, καθώς μπορεί ταυτόχρονα να μειώσει την απορροή των όμβριων υδάτων και να υποστηρίξει την αστική παραγωγή τροφίμων. Ωστόσο, απαιτούνται περαιτέρω μελέτες για να προσδιοριστεί εάν είναι κατάλληλος σε περιπτώσεις όπου ο κήπος βροχής δέχεται γενική απορροή όμβριων υδάτων από αδιαπέραστες αστικές επιφάνειες (Tom, et al., 2021).

Επιπλέον, οι κήποι βροχής συμβάλλουν στη μείωση της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος σε σύγκριση με σκληρές επιφάνειες, όπως το σκυρόδεμα, προσφέροντας ένα πιο δροσερό μικροκλίμα (Tang, 2024). Η εισαγωγή κήπων βροχής μπορεί να οδηγήσει σε μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης, καθώς μειώνεται η ανάγκη για μηχανικά συστήματα άντλησης και επεξεργασίας νερού. Επιπλέον, οι κήποι βροχής συμβάλλουν στη μείωση του φαινομένου της αστικής θερμικής νησίδας, προσφέροντας πιο δροσερά μικροκλίματα και μειώνοντας την ανάγκη για κλιματισμό. Ακόμα συμβάλλουν στην αύξηση της βιοποικιλότητας, προσφέροντας ενδιαίτημα για την άγρια ζωή και βελτιώνοντας την αισθητική του αστικού τοπίου. Επιπλέον, οι κήποι βροχής ενισχύουν τις οικοσυστημικές υπηρεσίες, όπως η διατήρηση της υγρασίας του εδάφους και η μείωση της διάβρωσης (Kasprzyk, et al., 2022).

Οι κήποι βροχής προσθέτουν οικολογική αξία στις οικιστικές αναπτύξεις φιλτράροντας θρεπτικά συστατικά, μέταλλα και παθογόνους μικροοργανισμούς από την απορροή των όμβριων υδάτων. Είναι γνωστό ότι οι κήποι βροχής φιλτράρουν περίπου το 90% του χαλκού, του μολύβδου και του ψευδαργύρου, το 50% του αζώτου και το 65% του φωσφόρου, τα οποία διαφορετικά θα κατέληγαν στα φρεάτια όμβριων υδάτων και τελικά σε υδάτινα σώματα.

Στον πίνακα 26 καταγράφεται η επίδραση που έχουν οι κήποι βροχής σε κάθε τομέα του πλέγματος WEFΕ, βάσει της προηγούμενης ανάλυσης.

Είναι σαφές ότι οι κήποι βροχής, ιδιαίτερα όταν συνδυάζονται με κατάλληλη βλάστηση, συμβάλλουν ουσιαστικά σε όλους τους επιμέρους τομείς του πλέγματος, οι οποίοι είναι στενά αλληλένδετοι και λειτουργούν συστημικά. Η πολυδιάστατη αυτή συνεισφορά ενισχύει τη βιωσιμότητα και την αποδοτικότητα των κήπων βροχής ως NBS, προσφέροντας σημαντικά οφέλη για την ολιστική διαχείριση των φυσικών πόρων και την προώθηση της αειφόρου ανάπτυξης στο αστικό περιβάλλον.

**Πίνακας 26** Κήποι βροχής και η επιρροή τους στο πλέγμα WEFΕ

Νερό	Ενέργεια	Τροφή	Οικοσύστημα
Μείωση πλημμυρών	Εξοικονόμηση ενέργειας για διαχείριση όμβριων	Άρδευση	Ενίσχυση βιοποικιλότητας
Αποθήκευση όμβριων υδάτων		Καλλιέργεια τροφίμων	Μείωση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης
Επαναχρησιμοποίηση Νερού			Αισθητική

## 6. Συμπεράσματα

Η διαχείριση των υδάτινων πόρων και η επαναχρησιμοποίηση του νερού αποτελούν θεμελιώδη ζητήματα που αναμένεται να απασχολήσουν εντονότερα την παγκόσμια κοινότητα στο προσεχές μέλλον. Μέσω της αξιοποίησης διαφόρων τύπων NBS, καθίσταται δυνατή η αποτελεσματική επεξεργασία και αξιοποίηση του νερού.

Όπως έχει αναφερθεί και στα προηγούμενα κεφάλαια, υπάρχουν πολυάριθμα είδη NBS, καθένα από τα οποία είναι κατάλληλο για διαφορετικούς τύπους νερού. Για παράδειγμα, οι τεχνητοί υγροβιότοποι είναι ιδιαίτερα αποδοτικοί για την επεξεργασία αστικών λυμάτων (τόσο γκρίζου όσο και μαύρου νερού), καθώς και για την επεξεργασία όμβριων υδάτων. Αντιθέτως, οι κήποι βροχής και τα συστήματα βιοκατακράτησης προτιμώνται κυρίως για τη διαχείριση βρόχινου και όμβριου νερού.

Ορισμένα NBS είναι πιο αποδοτικά, ενώ άλλα είναι πιο οικονομικά. Για παράδειγμα, στις πράσινες στέγες, οι εκτεταμένου τύπου είναι πιο οικονομικές, καθώς χρησιμοποιούν ελαφριά βλάστηση, ενώ οι εντατικού τύπου είναι πιο δαπανηρές αλλά και πιο αποδοτικές. Το πόσο οικονομική είναι μία λύση εξαρτάται από παράγοντες όπως το κόστος κατασκευής, η έκταση που καταλαμβάνει, ο τύπος της βλάστησης που περιλαμβάνει, καθώς και άλλα χαρακτηριστικά της υποδομής.

Οι βασικοί παράγοντες που καθορίζουν την καταλληλότητα κάθε NBS σχετίζονται με τη δυνατότητα μείωσης επιβλαβών ρύπων, καθιστώντας το νερό κατάλληλο είτε για άρδευση είτε για άλλες χρήσεις σύμφωνα με τα εκάστοτε θεσμοθετημένα πρότυπα κάθε χώρας. Μεταξύ αυτών των παραγόντων περιλαμβάνονται η συγκέντρωση βαρέων μετάλλων, η οσμή, η θολότητα, οι παράμετροι ολικών στερεών (TS) και οργανικών στερεών (VS), το χημικά απαιτούμενο οξυγόνο (COD), καθώς και η παρουσία παθογόνων μικροοργανισμών και βακτηρίων, όπως η *Escherichia coli*.

Πιο συγκεκριμένα, οι πράσινες στέγες συμβάλλουν στη βελτίωση της ρύθμισης των όμβριων υδάτων, μειώνοντας την επιφανειακή απορροή και επιβραδύνοντας τη ροή τους. Παράλληλα, συμβάλλουν στη μείωση της θερμοκρασίας των πόλεων, περιορίζοντας το φαινόμενο της αστικής θερμικής νησίδας. Επιπλέον, ενισχύουν τη βιοποικιλότητα και προσφέρουν αισθητική αναβάθμιση και βελτιωμένη ποιότητα ζωής στους κατοίκους.

Οι πράσινοι τοίχοι λειτουργούν ως φυσικά φίλτρα αέρα και συμβάλλουν στη ρύθμιση της θερμοκρασίας των κτιρίων, μειώνοντας την ενεργειακή κατανάλωση για ψύξη και θέρμανση. Ενισχύουν τη βιοποικιλότητα και βελτιώνουν την αισθητική εικόνα των αστικών χώρων, ενώ παρέχουν επιπλέον επιφάνειες για τη συγκράτηση υδάτων και τη μείωση της επιφανειακής απορροής.

Τα συστήματα συλλογής όμβριων υδάτων, μέσω της συλλογής και επαναχρησιμοποίησης των όμβριων, μειώνουν την ανάγκη άντλησης πόσιμου νερού για αστικές χρήσεις, συμβάλλοντας στην εξοικονόμηση φυσικών πόρων και στη μείωση της πίεσης στα δίκτυα ύδρευσης. Επιπλέον, περιορίζουν τα πλημμυρικά φαινόμενα και βελτιώνουν τη διαχείριση των υδάτινων πόρων στο αστικό περιβάλλον.

Οι τεχνητοί υγριοβιότοποι αποτελούν αποδοτικά φυσικά συστήματα επεξεργασίας λυμάτων που μειώνουν τη ρύπανση και επιτρέπουν την επαναχρησιμοποίηση του νερού για άρδευση ή, υπό προϋποθέσεις, για πόση. Επιπλέον, υποστηρίζουν την παραγωγή βιομάζας, προστατεύουν από πλημμύρες και ενισχύουν τη βιοποικιλότητα, ενώ οι σύγχρονες τεχνολογίες επιτρέπουν την παραγωγή ενέργειας από τη βιολογική δραστηριότητα που αναπτύσσεται εντός τους.

Τα συστήματα βιοκατακράτησης αποτελούν σύγχρονες υποδομές για τη συγκράτηση, φιλτράρισμα και απορρόφηση όμβριων υδάτων, μειώνοντας τη ρύπανση και προστατεύοντας τους υπόγειους υδροφορείς. Μειώνουν την καταπόνηση των συμβατικών συστημάτων αποστράγγισης, εξοικονομώντας ενέργεια και φυσικούς πόρους, ενώ βελτιώνουν το μικροκλίμα μέσω της βλάστησης, υποστηρίζοντας την αστική οικολογική ισορροπία.

Τέλος, οι κήποι βροχής λειτουργούν ως φυσικά σημεία συγκράτησης και διήθησης όμβριων υδάτων, περιορίζοντας την απορροή και τη ρύπανση που καταλήγει στα φυσικά υδάτινα σώματα. Βελτιώνουν την τοπική μικροκλιματική ισορροπία, υποστηρίζουν τη βιοποικιλότητα και μπορούν να ενσωματωθούν σε αστικούς χώρους, προσφέροντας αισθητικά και εκπαιδευτικά οφέλη.

Ανάλογα με την προβλεπόμενη χρήση και τον τύπο επεξεργασίας που εφαρμόζεται μέσω των NBS που αναλύθηκαν, μπορούν να καλυφθούν πλήθος αναγκών, όπως η άρδευση, η παραγωγή τροφίμων και η μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης στην παραγωγή τους. Το σημαντικότερο είναι ότι οι λύσεις αυτές όχι μόνο δεν επιβαρύνουν το περιβάλλον, αλλά, αντίθετα, βασίζονται σε φυσικές διεργασίες, ενισχύοντας τη λειτουργικότητα των οικοσυστημάτων και προάγοντας τη βιωσιμότητα, καλύπτοντας ολιστικά το πλέγμα WEFE.

Τα NBS μπορούν να επεξεργάζονται και να διαχειρίζονται τα ύδατα με μεγάλη αποδοτικότητα. Όσον αφορά τους υπόλοιπους τομείς του πλέγματος (νερό-ενέργεια-τροφήμα-οικοσυστήματα), η συμβολή τους εξαρτάται από το είδος του NBS. Για παράδειγμα, όλα τα NBS συμβάλλουν στην εξοικονόμηση ενέργειας και στην άρδευση, ωστόσο ορισμένα μπορούν να παράγουν άμεσα ενέργεια ή να συνεισφέρουν στην καλλιέργεια τροφίμων. Τέλος, σε σχέση με το οικοσύστημα, όλα τα είδη NBS συμβάλλουν στην αποκατάστασή του, στην παραγωγή οξυγόνου και στη δέσμευση του διοξειδίου του άνθρακα.

Με βάση την παραπάνω ανάλυση, αποδεικνύεται ότι τα NBS αποτελούν αξιόπιστα συστήματα για την επεξεργασία και τον καθαρισμό του νερού. Παράλληλα, προσφέρουν πολλαπλά οφέλη στο πλαίσιο του πλέγματος WEFE. Ιδιαίτερα αποτελεσματικές είναι όταν συνδυάζονται με τεχνολογίες όπως η συλλογή όμβριων υδάτων και τα φωτοβολταϊκά, που ενισχύουν τη βιωσιμότητα και παράγουν ενέργεια. Με κατάλληλη μελέτη και συνδυασμό μεθόδων, μπορούν να αντιμετωπιστούν σύγχρονες προκλήσεις των αστικών περιοχών, συμβάλλοντας στη διαχείριση και επαναχρησιμοποίηση του νερού.

## Βιβλιογραφία

[Ηλεκτρονικό]

**2020/741, (ΕΕ).** Κανονισμός (ΕΕ) 2020/741 του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 25ης Μαΐου 2020 σχετικά με τις ελάχιστες απαιτήσεις για την επαναχρησιμοποίηση των υδάτων (Κείμενο που παρουσιάζει ενδιαφέρον για τον ΕΟΧ). [Online] <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EL/ALL/?uri=CELEX:32020R0741>.

**91/271/ΕΟΚ, οδηγία.** Οδηγία 91/271/ΕΟΚ — επεξεργασία των αστικών λυμάτων. [Online] <https://eur-lex.europa.eu/EL/legal-content/summary/urban-waste-water-treatment.html>.

**A.N. Angelakis, D. Koutsoyiannis, G. Tchobanoglous. 2005.** Urban wastewater and stormwater technologies in ancient Greece. *Science Direct*. [Ηλεκτρονικό] January 2005. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2004.08.033>.

**Abdalla, Hadeer, Rahmat-Ullah, Zakiya and Abdallah, Mohamed. 2021.** Eco-efficiency analysis of integrated grey and black water management systems. *Science Direct*. [Online] September 2021. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344921002901>.

**Agaton, Casper Boongaling and Guila, Patricia Marie Caparas. 2023.** Ecosystem Services Valuation of Constructed Wetland as a Nature-Based Solution to Wastewater Treatment. [Online] January 31, 2023. <https://doi.org/10.3390/earth4010006>.

**Agnihotri, Vasudha, Chandola, Dinesh and c, Pooja Thathola. 2025.** Grey water treatment and circular economy. [Online] September 2025. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2025.144433>.

**Alar Teemusk, Ulo Mander. 2007.** Rainwater runoff quantity and quality performance from a. *Science Direct*. [Ηλεκτρονικό] 2 July 2007. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2007.01.009>.

**Ali, Shahbaz, et al. 2025.** Implementing urban rainwater harvesting systems: Multiple potential performances, barriers, challenges, solutions, and future perspectives. [Online] August 2025. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.115793>.

**Almeida, Liberalesso, Silva, Sousa. 2023.** Combining green roofs and rainwater harvesting systems in university buildings under different climate conditions. *Science Direct*. [Ηλεκτρονικό] 20 August 2023. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163719>.

**Anchan, Sanjith S. and Prasad, H.C. Shiva.** Feasibility of roof top rainwater harvesting potential - A case study of South Indian University. [Online] <https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100206>.

**Armin Azad, M. Neaz Sheikh, Faisal I. Hai. 2024.** A critical review of the mechanisms, factors, and performance of pervious concrete to remove contaminants from stormwater runoff. *Science Direct*. [Ηλεκτρονικό] 1 March 2024. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2024.121101>.

**Avery, Lisa M. 2007.** Constructed wetlands for grey water treatment. *Science Direct*. [Ηλεκτρονικό] 2007. [https://doi.org/10.1016/S1642-3593\(07\)70101-5](https://doi.org/10.1016/S1642-3593(07)70101-5).

**Ayda, Bereket Ayele. 2024.** Urban stormwater management under various runoff conditions for Arba Minch town of southern Ethiopia. *Science Direct*. [Ηλεκτρονικό] 27 February 2024. <https://doi.org/10.1016/j.nhres.2024.02.003>.

**Basanta Kumar Biswal, Nanthi Bolan, Yong-Guan Zhu , Rajasekhar Balasubramanian. 2022.** Nature-based Systems (NbS) for mitigation of stormwater and air pollution. *Science Direct*. [Ηλεκτρονικό] November 2022. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106578>.

**Basanta Kumar Biswal, Nanthi Bolan, Yong-Guan Zhu, Rajasekhar Balasubramanian. 2022.** Nature-based Systems (NbS) for mitigation of stormwater and air pollution. *science direct*. [Ηλεκτρονικό] November 2022. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344922004141>.

**Biedler, M., Carmona-Moreno, C., Dondeynaz, C. 2019.** Position paper on water, energy, food and ecosystems (WEFE) nexus and sustainable development goals (SDGs). [Ηλεκτρονικό] 2019. <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/265bda85-88db-11e9-9369-01aa75ed71a1/language-en>.

**Burn, L.S., et al. 2002.** Effect of demand management and system operation on potable water infrastructure costs. *Science direct*. [Online] September 2002. [https://doi.org/10.1016/S1462-0758\(02\)00018-3](https://doi.org/10.1016/S1462-0758(02)00018-3).

**Cambridge, Dictionary.**

**Carla S.S. Ferreira, Milica Kašanin-Grubin, Marijana Kapović Solomun, Svetlana Sushkova, Tatiana Minkina, Wenwu Zhao, Zahra Kalantari. 2023.** Wetlands as nature-based solutions for water management in different environments. *Science Direct*. [Ηλεκτρονικό] June 2023. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2023.100476>.

**Carvalho, Pedro N., et al. 2022.** Nature-based solutions addressing the water-energy-food nexus: Review of theoretical concepts and urban case studies. *Science Direct*. [Online] March 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130652>.

**Cesar, CARMONA MORENO, Celine, DONDEYNAZ and Murray, BIEDLER. 2019.** Position Paper on Water, Energy, Food and Ecosystem (WEFE) Nexus and Sustainable development Goals (SDGs). [Online] June 5, 2019. <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/265bda85-88db-11e9-9369-01aa75ed71a1/language-en>.

**Chapagain, Kaushal, et al. 2023.** Integrated assessment of water–energy–food nexus: conceptual framework and application to the Ping River basin, Thailand. [Online] 13 October 2023. <https://doi.org/10.1080/07900627.2023.2252529>.

**Chi-Feng Chen, Yi-Wei Chen, Cheng-Han Lin, Jen-Yang Lin. 2024.** Field performance of 15 rain gardens in different cities in Taiwan. *Science Direct*. [Ηλεκτρονικό] 15 October 2024. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.174545>.

**Compaoré, Cheik Omar Tidiane. 2024.** Assessing greywater characteristics in the sahel region and perception of the local population on its reuse in agriculture. *Science Direct*. [Ηλεκτρονικό] 30 July 2024. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e33473>.

**Cristiano, Elena, Deidda, Roberto and Viola, Francesco. 2021.** The role of green roofs in urban Water-Energy-Food-Ecosystem nexus: A review. [Online] February 20, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143876>.

**Davis, A.P., Shokouhian, M., Sharma, H., Minami, C. 2006.** Water Quality Improvement through Bioretention Media: Nitrogen and Phosphorus Removal. *Wiley Online Library*. [Ηλεκτρονικό] 1 March 2006. <https://doi.org/10.2175/106143005X94376>.

**European-Commission.** Energy, Climate change, Environment. [Online] [https://environment.ec.europa.eu/topics/water\\_en?utm\\_source=chatgpt.com](https://environment.ec.europa.eu/topics/water_en?utm_source=chatgpt.com).

- European-Union.** Consolidated text: Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy. [Ηλεκτρονικό] <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A02000L0060-20141120>.
- Fiorentin, Débora Pons, et al. 2024.** Life Cycle Assessment of green roofs: A comprehensive review of methodological approaches and climate change impacts. [Online] March 2024. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2024.02.004>.
- Genevieve Bennett, Jan Cassin, Nathaniel Carroll and Genevieve , Bennett. 2016.** Natural infrastructure investment and implications for the nexus: A global overview. *Science Direct*. [Online] February 2016. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2015.05.006>.
- Gholami-Borujeni, Fathollah. 2018.** Data on effluent toxicity and physicochemical parameters of municipal wastewater treatment plant using *Daphnia Magna*. *Science Direct*. [Ηλεκτρονικό] August 2018. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2018.06.076>.
- Gößner, Dominik. 2025.** Green roof performance monitoring: Insights on physical properties of 4 extensive green roof types after 2 years of microclimatic measurements. *Science Direct*. [Ηλεκτρονικό] 1 February 2025. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.112356>.
- Gutiérrez-Nava, Jaime Adriano, et al. 2025.** Sustainable urban water management index for developing countries. A case study in Puebla City, Mexico. [Online] March 2025. <https://doi.org/10.1016/j.jum.2024.09.007>.
- Hadeer Abdalla, Zakiya Rahmat-Ullah, Mohamed Abdallah. 2021.** Eco-efficiency analysis of integrated grey and black water management systems. *Science direct*. [Ηλεκτρονικό] September 2021. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105681>.
- Han, Guilin. 2019.** Ca and Sr isotope compositions of rainwater from Guiyang city, Southwest China: Implication for the sources of atmospheric aerosols and their seasonal variations. *Science Direct*. [Ηλεκτρονικό] October 2019. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.116854>.
- Hunt, W.F., Smith, J.T., Jadlocki, S.J., Hathaway, J.M., Eubanks, P.R. 2008.** Pollutant Removal and Peak Flow Mitigation by a Bioretention Cell in Urban Charlotte, N.C. *ASCE Library*. [Ηλεκτρονικό] 1 May 2008. <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%290733-9372%282008%29134%3A5%28403%29>.
- Istrate, Aura-Luciana and Hamel, Perrine. 2023.** Urban Nature Games for integrating nature-based solutions in urban planning: A review. [Online] November 2023. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2023.104860>.
- IUCN, INTERNATIONAL UNION FOR CONSERVATION OF NATURE. 2020.** IUCN Global Standard for Nature-based Solutions A user-friendly framework for the verification, design and scaling up of NbS. [Online] 2020. <https://doi.org/10.2305/IUCN.CH.2020.08.en>.
- Jadhav N., T. Brown, L. Williams, M. Pidou. 2024.** Characterisation of blackwater from human transportation systems equipped with vacuum toilets and controlled emissions tanks and its impact on solid/liquid separation technologies. *Science Direct*. [Ηλεκτρονικό] September 2024. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.106083>.
- Javan, Kazem, et al. 2025.** Interrelated issues within the Water-Energy-Food nexus with a focus on environmental pollution for sustainable development: A review. [Online] March 1, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2025.125706>.

**Javed, Fahed, Hassan, Ashraf Aly and Zuhair, Sulaiman Al. 2025.** Microalgae–bacteria consortia for the treatment of fat, oil, and grease wastewater: Recent progress, interaction mechanisms, and application prospects. [Online] August 2025. <https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2025.100797>.

**Jiabin Li, Xue Liu, Changxiong Zhu, Tingting Song, Zhuobo Chen, Shan Jin, Bing Geng. 2023.** Bacterial dynamics and functions driven by biomass wastes to promote rural toilet blackwater absorption and recycling in an ectopic fermentation system. *Science Direct*. [Ηλεκτρονικό] March 2023. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.137804>.

**Jiayu Liu, Allen P. Davis. 2013.** Phosphorus Speciation and Treatment Using Enhanced Phosphorus Removal Bioretention. *ACS Publications*. [Ηλεκτρονικό] 9 December 2013. <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/es404022b>.

**Jin Su, Mo Wang. 2024.** A systematic and bibliometric review of bioretention system (BRS) for urban ecosystem regulation services. *Science Direct*. [Ηλεκτρονικό] May 2024. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2024.101923>.

**Kasprzyk, Magda, και συν. 2022.** Technical solutions and benefits of introducing rain gardens – Gdańsk case study. [Ηλεκτρονικό] 20 August 2022. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155487>.

**Kõiv-Vainik, Margit. 2022.** Urban stormwater retention capacity of nature-based solutions at different climatic conditions. *Science Direct*. [Ηλεκτρονικό] December 2022. <https://doi.org/10.1016/j.nbsj.2022.100038>.

**Kudlek, Edyta, Rapacewicz, Rafał and a, Anna Lempart-Rapacewicz. 2025.** Micropollutant removal through nanofiltration in the treatment of rainwater and stormwater for recreational purposes. [Online] January 2025. <https://doi.org/10.1016/j.dwt.2024.100917>.

**Kumar, Prashant, et al. 2021.** Nature-based solutions efficiency evaluation against natural hazards: Modelling methods, advantages and limitations. *Science Direct*. [Online] 25 August 2021. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147058>.

**Kumar, Vishwakarma and Tyagi, Vinay Kumar. 2024.** Stormwater runoff characterization and adaptation of best management practices under urbanization and climate change scenarios. *Science Direct*. [Online] May 2024. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.131231>.

**Langergraber and Guenter. 2021.** A Framework for Addressing Circularity Challenges in Cities. *MDPI*. [Online] August 27, 2021. <https://www.mdpi.com/2073-4441/13/17/2355>.

**Lehmann-Konera, Sara. 2023.** Rainwater chemistry composition in Bellsund: Sources of elements and deposition discrepancies in the coastal area (SW Spitsbergen, Svalbard). *Science Direct*. [Ηλεκτρονικό] February 2023. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045653522037742>.

**Leong, Janet Yip Cheng. 2017.** Prospects of hybrid rainwater-greywater decentralised system for water recycling and reuse: A review. *Science Direct*. [Ηλεκτρονικό] 20 January 2017. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095965261631798X>.

**Li Xiangyu, Jin Zhou, Yingqi Tang, et al. 2022.** A hydroponic vertical greening system for disposal and utilization of pre-treated Blackwater: Optimization of the operating conditions. *Science Direct*. [Ηλεκτρονικό] October 2022. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2022.106739>.

**Li και Chen. 2024.** Coagulation pretreatment coupled with indigenous microalgal-bacterial consortium system for on-site treatment of rural black wastewater. *Science Direct*. [Ηλεκτρονικό] 25 February 2024. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169728>.

**Li, Shouhong Zhang, και LI, Ruixian. 2024.** Impacts of compatibility between rainwater availability and water demand on water saving performance of rainwater harvesting systems. *Science Direct*. [Ηλεκτρονικό] November 2024. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.122722>.

**Li, Wichmann, Knut και Otterpohl, Ralf. 2009.** Review of the technological approaches for grey water treatment and reuses. *Science direct*. [Ηλεκτρονικό] 15 May 2009. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2009.02.004>.

**Liao, Zhongtang, Xu, Ying and Liu, Jialin. 2025.** Toward low-maintenance extensive green roofs: A review for plant selection and substrate design. [Online] September 2025. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2025.128864>.

**Liqing Li, Allen P. Davis. 2014.** Urban Stormwater Runoff Nitrogen Composition and Fate in Bioretention Systems. *ACS Publications*. [Ηλεκτρονικό] 26 February 2014. <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/es4055302>.

**Liu, Bo-Wei, και συν. 2020.** Establishment and implementation of green infrastructure practice for. [Ηλεκτρονικό] June 2020. <https://doi.org/10.1016/j.wen.2020.05.003>.

**Liu, Cheng. 2020.** Effects of lead (Pb) in stormwater runoff on the microbial characteristics and organics removal in bioretention systems. *sciencedirect*. [Ηλεκτρονικό] August 2020. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126721>.

**Lucke, T., Peter. 2015.** The pollution removal and stormwater reduction performance of street-side bioretention basins after ten years in operation. *Science Direct*. [Ηλεκτρονικό] 1 December 2015. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.07.142..>

**Luxon Nhamo, Sylvester Mpandeli, Stanley Liphadzi, Tafadzwanashe Mabhaudhi και Luxon, Nhamo. 2025.** Catalyzing sustainable development goals through the water-energy-food nexus. [Ηλεκτρονικό] 21 February 2025. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2025.111902>.

**Ma, Yuan, et al. 2024.** Water Resources Research. [Online] 2024. <https://www.researchgate.net/journal/Water-Resources-Research-1944-7973>.

**Madgundi, Murali M. 2023.** Design and investigation on rain saucer: The technique of roofless rainwater harvesting. *Science Direct*. [Ηλεκτρονικό] 2023. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785322059879>.

**Mancuso, Giuseppe, Lavrnić, Stevo and Canet-Martí, Alba. 2023.** Performance of lagoon and constructed wetland systems for tertiary wastewater treatment and potential of reclaimed water in agricultural irrigation. *Science Direct*. [Online] December 15, 2023. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479723020662>.

**Matesun, Joshua, et al. 2024.** Limitations of wastewater treatment plants in removing trace anthropogenic biomarkers and future directions: A review. [Online] 2024. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.116610>.

**Mazurkiewicz, Karolina. 2022.** Physicochemical and microbiological quality of rainwater harvested in underground retention tanks. *Science Direct*. [Ηλεκτρονικό] March 2022. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969721077792>.

**Medl, Alexandra, Stangl, Rosemarie and Florineth, Florin. 2017.** Vertical greening systems – A review on recent technologies and research advancement. [Online] November 15, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.08.054>.

- Milad Reyhani, Enrica Santolini. 2024.** Environmental assessment of green wall: A comparison between Australia and Italy. *Science Direct*. [Ηλεκτρονικό] 20 December 2024. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969724078562>.
- Mishr, Rankeshwarnath Sanjay. 2022-2023.** Assessing policy and governance aspects for the implementation of Nature-based Solutions (NBS) to manage the Water-Energy-Food-Ecosystem (WEFE) nexus in a Mediterranean watershed. [Online] 2022-2023. <https://hdl.handle.net/20.500.12608/60507>.
- Moeen Gholami, Aisling D. O'Sullivan , Hamish R. Mackey. 2023.** Nutrient treatment of greywater in green wall systems: A critical review of removal mechanisms, performance efficiencies and system design parameters. *Science Direct*. [Ηλεκτρονικό] November 2023. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030147972301705X>.
- Morash, Jennifer, et al. 2019.** Increasing Sustainability of Residential Areas Using Rain Gardens to Improve Pollutant Capture, Biodiversity and Ecosystem Resilience. [Online] June 13, 2019. <https://doi.org/10.3390/su11123269>.
- Moravej, Mojtaba, et al. 2025.** Vertical green systems (VGSs) and on-site storage for stormwater management. [Online] August 1, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2025.123560>.
- My-Linh Nguyen, Paul Westerhoff, Lawrence Baker, Qiang Hu, Mario Esparza-Soto, Milton Sommerfeld. 2005.** Characteristics and Reactivity of Algae-Produced Dissolved Organic Carbon. *ASCE Library*. [Ηλεκτρονικό] 1 November 2005. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(2005\)131:11\(15\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(2005)131:11(15)).
- Nikolaos P. Nikolaidis, et al και Nikolaidis, Nikolaos P. 2025.** An integrated participatory framework for WEFE nexus strategic planning: The Jordan Valley case study. *Science Direct*. [Ηλεκτρονικό] February 2025. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.124246>.
- Noutsopoulos., C., et al. 2018.** Greywater characterization and loadings – Physicochemical treatment to promote onsite reuse. *Science direct*. [Online] June 15, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.05.094>.
- Oghazi, Pejvak, et al. 2022.** Ecosystems transformation through disruptive innovation: A definition, framework and outline for future research. [Online] August 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2022.03.073>.
- Omer Khalid, Simon Gidstedt, Frank Lipnizki. 2024.** Direct Membrane Filtration (DMF) of municipal wastewater – A study on the prevention and remediation of fouling. *Science Direct*. [Ηλεκτρονικό] November 2024. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.106235>.
- Ouyang, Boda, et al. 2025.** Energy production and denitrogenation performance by sludge biochar based constructed wetlands-microbial fuel cells system: Overcoming carbon constraints in water. [Online] 1 April 2025. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2024.123024>.
- Overton, Donald E. and E., Michael. 2013.** Stormwater Modeling. [Online] October 22, 2013. <https://shop.elsevier.com/books/stormwater-modeling/overton/978-0-12-531550-0>.
- Palatnik, Ruslana Rachel, et al. 2025.** Water scarcity and food security in the mediterranean region: The role of alternative water sources and controlled-environment agriculture. [Online] January 2025. <https://doi.org/10.1016/j.wre.2025.100256>.
- Palermo, Stefania Anna, et al. 2023.** Experimental analysis to assess the hydrological efficiency and the nutrient leaching behavior of a new green wall system. [Online] November 25, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166301>.

- Prado, Helena A., et al. 2024.** Designing nature to be a solution for climate change in cities: A meta-analysis. [Online] December 1, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.176735>.
- Pritchard, James Conrad. 2024.** Flow rate and kinetics of trace organic contaminants removal in black carbon-amended engineered media filters for improved stormwater runoff treatment. *Science direct*. [Ηλεκτρονικό] July 2024. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2024.121811>.
- Rajni Kaushik, Rajasekhar Balasubramanian. 2012.** Assessment of bacterial pathogens in fresh rainwater and airborne particulate matter using Real-Time PCR. *Science Direct*. [Ηλεκτρονικό] January 2012. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.10.013>.
- Razguliaev, N. 2024.** Urban stormwater quality: A review of methods for continuous field monitoring. *Science Direct*. [Ηλεκτρονικό] 1 Febtuary 2024. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.120929>.
- Restrepo, Juan Diego, et al. 2024.** Assessing the Impacts of Nature-Based Solutions on Ecosystem Services: A Water-Energy-Food-Ecosystems Nexus Approach in the Nima River Sub-Basin (Colombia). [Online] 2024. <https://doi.org/10.3390/f15111852>.
- Reyhani, Milad, και συν. 2024.** Environmental assessment of green wall: A comparison between Australia and Italy. [Ηλεκτρονικό] 20 December 2024. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.177699>.
- Sánchez, A.S., Cohim, E. and Kalid, R.A. 2015.** A review on physicochemical and microbiological contamination of roof-harvested rainwater in urban areas. *Science Direct*. [Online] September 2015. <https://doi.org/10.1016/j.swaqe.2015.04.002>.
- Sang, Åsa Ode, Thorpert, Petra and Fransson, Ann-Mari. 2022.** Planning, Designing, and Managing Green Roofs and Green Walls for Public Health – An Ecosystem Services Approach. [Online] April 29, 2022. <https://doi.org/10.3389/fevo.2022.804500>.
- Santos, Joice, et al. 2024.** A state-of-the-art review (2019–2023) on constructed wetlands for greywater treatment and reuse. [Online] August 2024. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2024.100973>.
- Shafique, Muhammad, Kim, Reeho and Rafiq, Muhammad. 2018.** Green roof benefits, opportunities and challenges – A review. [Online] July 2018. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.006>.
- Shoushtarian, Farshid and Negahban-Azar, Masoud. 2020.** Worldwide Regulations and Guidelines for Agricultural Water Reuse: A Critical Review. [Online] 2020. <https://doi.org/10.3390/w12040971>.
- Silva, Ana Carolina Rodrigues de Sá, et al. 2022.** Exploring environmental, economic and social aspects of rainwater harvesting systems: A review. [Online] January 2022. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103475>.
- Slompo, Quartaroli, Tania Vasconcelos Fernandes, Gustavo Henrique Ribeiro da Silva, Luiz Antonio Daniel. 2020.** Nutrient and pathogen removal from anaerobically treated black water by microalgae. *Science Direct*. [Ηλεκτρονικό] 15 August 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110693>.
- Sofiyah, Evi Siti, et al. 2025.** Adaptive governance in the water-energy-food-ecosystem nexus for sustainable community sanitation. [Online] April 25, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.wds.2025.100220>.
- Sousa, Valesca Hellen Ferreira de, et al. 2025.** Bench-scale bioretention systems: Potential of substrates with and without coconut fiber for plant growth development. [Online] March 2025. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.124512>.

**Steele, Joshua A., et al. 2018.** Quantification of pathogens and markers of fecal contamination during storm events along popular surfing beaches in San Diego, California. [Online] June 2018. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.01.056>.

**Swinbourne, Cassady, Kenway, Steven and O'Brien, Katherine R. 2024.** Urban greenery and alternative water sources critically interconnect water supply, cooling, and drainage in urban precincts. [Online] January 2024. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2024.101812>.

**Tang, Shuangcheng. 2024.** Optimizing stormwater runoff treatment: The role of two-stage tandem rain gardens. *Science Direct*. [Ηλεκτρονικό] 1 December 2024. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0013935124017365>.

— . 2024. Optimizing stormwater runoff treatment: The role of two-stage tandem rain gardens. *Science Direct*. [Ηλεκτρονικό] 1 December 2024. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.119831>.

**The World Bank, International Bank for Reconstruction and Development. 2021.** A catalogue of nature-based solutions for urban resilience. [Online] 2021. <https://documents.worldbank.org/en/publication/documents-reports/documentdetail/502101636360985715/a-catalogue-of-nature-based-solutions-for-urban-resilience>.

**Tom, M., et al. 2021.** Turning (storm)water into food; the benefits and risks of vegetable raingardens. [Online] July 28, 2021. <https://hal.science/hal-03303512v1>.

**Tripathy, Purusottam, Kulkarni, Harshad V. and Kalla, Sarita. 2025.** Exploration of multifaceted domain of advanced membrane separation processes for wastewater treatment and desalination – A review. [Online] November 1, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2025.119133>.

**Tusiime, Anna. 2022.** Performance of lab-scale filtration system for grey water treatment and reuse. *Science Direct*. [Ηλεκτρονικό] December 2022. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2022.100641>.

**V. Thomaidi, I. Petousi, D. Kotsia, N. Kalogerakis, M.S. Fountoulakis. 2022.** Use of green roofs for greywater treatment: Role of substrate, depth, plants, and recirculation. *Science Direct*. [Ηλεκτρονικό] 10 February 2022. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151004>.

**Vijayaraghavan, Kuppusamy, et al. 2021.** Bioretention systems for stormwater management: Recent advances and future prospects. [Online] August 15, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112766>.

**Wang, Mo, et al. 2017.** Constructed wetlands for wastewater treatment in cold climate — A review. [Online] July 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2016.12.019>.

**Wang, Ziang. 2024.** Comparison of anaerobic co-digestion of vacuum toilet blackwater and kitchen waste under mesophilic and thermophilic conditions: Reactor performance, microbial response and metabolic pathway. *Science Direct*. [Ηλεκτρονικό] August 2024. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.121725>.

**Wen Cangxiang, Zheqin Dai , et al. 2024.** Enhancing energy recovery and microbial stability in blackwater anaerobic digestion with graphite felt. [Ηλεκτρονικό] February 2024. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.104808>.

**Xu, Jiao. 2023.** A systematical review of blackwater treatment and resource recovery: Advance in technologies and applications. *Science Direct*. [Ηλεκτρονικό] October 2023. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.107066>.

**Yan Xu, Kexin Ma, Xue Wang, Danyi Zhang, Jianing Xu, Yazhi Liu. 2024.** Impacts of polymethyl methacrylate nanoplastics on nutrient removal, *Science Direct*. [Ηλεκτρονικό] May 2024. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.105360>.

**Ye, Weiyi, et al. 2023.** Applicability of photovoltaic panel rainwater harvesting system in improving water-energy-food nexus performance in semi-arid areas. [Online] October 20, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164938>.

**Ευρωπαϊκό-Κοινοβούλιο. 2023.** Κανονισμός για την επαναχρησιμοποίηση των υδάτων (ΕΕ) 2020/741. [Online] 2023. [https://www.moa.gov.cy/moa/wdd/wdd.nsf/page83\\_gr/page83\\_gr?opendocument](https://www.moa.gov.cy/moa/wdd/wdd.nsf/page83_gr/page83_gr?opendocument).

**Ευρωπαϊκό-Κοινοβούλιο. 2020.** Οδηγία (ΕΕ) 2020/2184 του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 16ης Δεκεμβρίου 2020 σχετικά με την ποιότητα του νερού ανθρώπινης κατανάλωσης (αναδιατύπωση) (Κείμενο που παρουσιάζει ενδιαφέρον για τον ΕΟΧ). [Online] 2020. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EL/TXT/?uri=CELEX:32020L2184>.