



Σχολή Θετικών Επιστημών και Τεχνολογίας

Διαχείριση Τεχνικών Έργων

Διπλωματική Εργασία

«Αποτίμηση της αποτελεσματικότητας των Λύσεων Βασισμένων
στη Φύση (Nature Based Solutions) στη Διαχείριση
Ομβρίων Υδάτων σε Αστικά Περιβάλλοντα»

Σωτηρία Καραπέτρου

Επιβλέπων καθηγητής: Κωνσταντίνος Λιώλιος

Πάτρα, Ιούνιος 2026

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



«Αποτίμηση της αποτελεσματικότητας των Λύσεων Βασισμένων
στη Φύση (Nature Based Solutions) στη Διαχείριση
Ομβρίων Υδάτων σε Αστικά Περιβάλλοντα»

Σωτηρία Καραπέτρου

Επιτροπή Επίβλεψης Πτυχιακής / Διπλωματικής Εργασίας

Επιβλέπων Καθηγητής:
Κωνσταντίνος Λιώλιος
Διδάκτωρ Μηχανικός Περιβάλλοντος
Μέλος ΣΕΠ ΔΧΤ/ΣΘΕΤ ΕΑΠ

Συν-Επιβλέπων Καθηγητής:
Νικόλαος Φουρνιώτης
Αναπληρωτής Καθηγητής
Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών
Πανεπιστήμιο Πελοποννήσου
Μέλος ΣΕΠ ΔΧΤ/ΣΘΕΤ ΕΑΠ

Πάτρα, Ιούνιος 2026

Στην οικογένειά μου, με αγάπη

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται την αποτίμηση της αποτελεσματικότητας των Λύσεων Βασισμένων στη Φύση (Nature Based Solutions - NBS) στη διαχείριση των ομβρίων υδάτων σε αστικά περιβάλλοντα. Η αυξανόμενη αστικοποίηση, σε συνδυασμό με τις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής, έχει οδηγήσει σε σημαντική μεταβολή του υδρολογικού κύκλου, εντείνοντας την επιφανειακή απορροή και αυξάνοντας τη συχνότητα και την ένταση των πλημμυρικών φαινομένων. Στο πλαίσιο αυτό, αναδεικνύεται η ανάγκη μετάβασης από τις συμβατικές «γκρίζες» υποδομές σε πιο ολοκληρωμένες και βιώσιμες προσεγγίσεις διαχείρισης.

Οι NBS αποτελούν μια εναλλακτική ή συμπληρωματική στρατηγική, καθώς αξιοποιούν φυσικές διεργασίες, όπως η διήθηση, η κατακράτηση και η εξατμισοδιαπνοή, συμβάλλοντας τόσο στη ρύθμιση της απορροής όσο και στη βελτίωση της ποιότητας των υδάτων. Σκοπός της εργασίας είναι η διερεύνηση της συμβολής των NBS στη μείωση του πλημμυρικού κινδύνου και η συνολική αξιολόγηση της απόδοσής τους σε υδρολογικό, περιβαλλοντικό και λειτουργικό επίπεδο. Η μεθοδολογική προσέγγιση βασίζεται στην ανάλυση της διεθνούς βιβλιογραφίας, στην εξέταση εφαρμογών NBS σε αστικά περιβάλλοντα και στην ανάπτυξη ενός πλαισίου αξιολόγησης που λαμβάνει υπόψη υδρολογικούς δείκτες, παραμέτρους ποιότητας υδάτων και κριτήρια βιωσιμότητας. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στη μείωση της αιχμής και του όγκου απορροής, στην αύξηση του χρόνου συγκέντρωσης, καθώς και στη δυνατότητα συγκράτησης ρύπων.

Τα αποτελέσματα της έρευνας καταδεικνύουν ότι οι NBS μπορούν να συμβάλουν ουσιαστικά στη διαχείριση των ομβρίων υδάτων και στη μείωση του πλημμυρικού κινδύνου, προσφέροντας παράλληλα σημαντικά περιβαλλοντικά και κοινωνικά οφέλη, όπως η ενίσχυση της αστικής βιοποικιλότητας και η βελτίωση του μικροκλίματος. Ωστόσο, η αποτελεσματικότητά τους εξαρτάται από την ορθή επιλογή, τον κατάλληλο σχεδιασμό και τη συστηματική συντήρησή τους, καθώς και από την ενσωμάτωσή τους σε ένα ευρύτερο πλαίσιο βιώσιμου αστικού σχεδιασμού.

Λέξεις – Κλειδιά

Λύσεις βασισμένες στη φύση, διαχείριση ομβρίων υδάτων, πλημμυρικός κίνδυνος, αστικός σχεδιασμός, βιώσιμη ανάπτυξη

Assessment of the Effectiveness of Nature Based Solutions (NBS) in Urban Stormwater Management

Sotiria Karapetrou

Abstract

This study examines the effectiveness of Nature-Based Solutions (NBS) as a sustainable approach to urban stormwater management in the context of increasing urbanization and the impacts of climate change. The continuous expansion of impervious surfaces, combined with the growing intensity and frequency of extreme precipitation events, has significantly disrupted the natural hydrological cycle. This disruption has led to increased surface runoff, diminished infiltration capacity, and an elevated risk of flooding in urban areas. These developments highlight the limitations of conventional “grey” infrastructure and emphasize the need for integrated, adaptive, and resilient management strategies.

Within this context, NBS emerge as a promising alternative or complementary approach. By harnessing natural and semi-natural processes - such as infiltration, retention, detention, and evapotranspiration - NBS contribute to the regulation of hydrological responses while simultaneously improving water quality. The primary aim of this study is to critically evaluate the contribution of NBS to flood risk mitigation and to systematically assess their performance across hydrological, environmental, and functional dimensions.

The methodological framework of the study is based on a comprehensive review of the international literature, the critical analysis of selected case studies, and the development of a multi-criteria evaluation framework. This framework incorporates key hydrological indicators, water quality parameters, and sustainability metrics. Particular emphasis is placed on parameters such as peak discharge attenuation, reduction of total runoff volume, extension of concentration time, and the capacity for pollutant retention and removal.

The findings indicate that Nature-Based Solutions can play a significant role in enhancing urban flood resilience and promoting sustainable stormwater management. In addition to their hydrological benefits, NBS provide a range of co-benefits, including the enhancement of urban biodiversity, the regulation of the urban microclimate, and the improvement of overall quality of life. However, their effectiveness is highly dependent on context-specific design considerations, appropriate selection and integration within existing infrastructure systems, and the implementation of long-term maintenance strategies. Therefore, the successful adoption of NBS requires their integration into comprehensive urban planning frameworks that prioritize sustainability, resilience, and multifunctionality.

Keywords

Nature based solutions, stormwater management, flood risk, urban planning, sustainable development

Περιεχόμενα

Περίληψη ν

Abstract vi

Περιεχόμενα viii

Κατάλογος Σχημάτων / Εικόνων xi

Κατάλογος Πινάκων xiii

Συντομογραφίες & Ακρωνύμια xiv

1. Εισαγωγή 1

1.1 Αντικείμενο και σημασία της έρευνας 1

1.2 Σκοπός και στόχοι της διπλωματικής εργασίας 2

1.3 Μεθοδολογική προσέγγιση 4

1.4 Δομή της διπλωματικής εργασίας 4

2. Θεωρητικό υπόβαθρο και ανασκόπηση βιβλιογραφίας 7

2.1 Υδρολογικός κύκλος και μεταβολές του σε αστικά περιβάλλοντα 7

2.1.1 Βασικές έννοιες και διεργασίες 7

2.1.2 Αστικοποίηση και μεταβολές υδρολογικού κύκλου 10

2.2 Πλημμυρικός κίνδυνος σε αστικά περιβάλλοντα 11

2.2.1 Βασικές έννοιες και ισχύον νομικό πλαίσιο 11

2.2.2 Πλημμυρικός κίνδυνος και κλιματική αλλαγή 14

2.3 Αστικές πλημμύρες και ανθεκτικότητα των πόλεων 20

2.4 Συμβατικές προσεγγίσεις διαχείρισης ομβρίων υδάτων («γκρι» υποδομές) 25

2.5 Σύγχρονες προσεγγίσεις διαχείρισης ομβρίων υδάτων 26

2.5.1 Υδρολογικά ευαίσθητος αστικός σχεδιασμός 26

2.5.2 Έννοια και αρχές των Λύσεων Βασισμένων στη Φύση (NBS) 28

2.5.3 Συνδυαστική προσέγγιση NBS και συμβατικών (γκρίζων) υποδομών στη
διαχείριση ομβρίων υδάτων 30

3. Λύσεις βασισμένες στη φύση (NBS) 33

3.1 Σχέσεις και εννοιολογικές διασυνδέσεις των NBS στη Φύση με συναφείς έννοιες 33

3.2 Κατηγοριοποίηση και τυπολογία των NBS 39

3.3 Μηχανισμοί λειτουργίας (Απορροή, διήθηση, αποθήκευση, εξάτμιση) 45

3.3.1 Απορροή 46

3.3.2 Διήθηση 49

3.3.3 Κατακράτηση	51
3.3.4 Εξάτμιση και εξατμισοδιαπνοή.....	51
3.4 Υδρολογική και υδραυλική απόδοση των NBS σε αστικό περιβάλλον	53
3.5 Περιβαλλοντικά και κοινωνικά οφέλη.....	55
3.6 Περιορισμοί και προκλήσεις εφαρμογής σε αστικά περιβάλλοντα	57
4. Μεθοδολογικό πλαίσιο διαχείρισης ομβρίων υδάτων χρησιμοποιώντας NBS.....	61
4.1 Ερευνητική προσέγγιση και σχεδιασμός της μελέτης.....	61
4.2 Υδρολογικά και υδραυλικά λογισμικά προσομοίωσης.....	63
4.2 Σχεδιασμός, επιλογή, αξιολόγηση και υλοποίηση των NBS	65
4.2.1 Επιλογή των NBS.....	66
4.2.2 Αξιολόγηση των NBS	66
4.2.3 Βελτιστοποίηση των NBS	68
4.2.3 Εργαλεία για την επιλογή, την αξιολόγηση και τη λειτουργία των NBS	70
4.2 Συλλογή και επεξεργασία δεδομένων	72
4.3 Αβεβαιότητες και ποιότητα δεδομένων	75
4.4 Ανάπτυξη σεναρίων και δείκτες αξιολόγησης.....	76
4.5 Παραδείγματα εφαρμογής των NBS σε αστικά περιβάλλοντα.....	77
4.5.1 Παρουσίαση μελέτης: Yang και συν., 2020.....	79
4.5.2 Παρουσίαση μελέτης: Vojinovic et al. (2021).....	84
4.5.3 Παρουσίαση μελέτης: Theochari & Baltas (2024)	88
4.5.4 Παρουσίαση μελέτης: Sciuto et al. (2024).....	92
4.5.5 Συζήτηση βιβλιογραφίας.....	96
4.5 Συζήτηση αποτελεσμάτων και αξιολόγηση αποτελεσματικότητας των NBS	100
5. Διεθνής εμπειρία και εφαρμογές NBS σε αστικά περιβάλλοντα	103
5.1 Σύγχρονες εφαρμογές NBS.....	103
5.2 Διεθνή ερευνητικά προγράμματα για NBS	109
5.2.1 Εφαρμογές NBS σε αστικά περιβάλλοντα.....	109
5.2.1 Εφαρμογές NBS για τη διαχείριση ομβρίων υδάτων	115
5.3 Εφαρμογές NBS στην Ελλάδα	118
6. Συμπεράσματα	125
6.1 Περιορισμοί και μελλοντική έρευνα.....	126
6.2 Χρησιμότητα της έρευνας και πρακτικές εφαρμογές	127
Βιβλιογραφία.....	129

Κατάλογος Σχημάτων / Εικόνων

Σχήμα 1 Σχηματική αναπαράσταση του υδρολογικού κύκλου χωρίς την επιρροή του ανθρώπινου παράγοντα	7
Σχήμα 2 Σχηματισμός κορεσμένης και ακόρεστης ζώνης του εδαφικού σχηματισμού	9
Σχήμα 3 Σχηματική απεικόνιση των βασικών παραμέτρων που ορίζουν τον πλημμυρικό κίνδυνο	13
Σχήμα 4 Αριθμός καταστροφών (αριστερά) και αριθμός πλημμυρών (δεξιά) με μία ή περισσότερες απώλειες όπως καταγράφηκαν στη βάση EM-DAT για την περίοδο 1975-2022.....	16
Σχήμα 5 Συχνότητα παγκόσμιων καταστροφών από πλημμύρες για το χρονικό διάστημα 1992 έως 2021	16
Σχήμα 6 Έκθεση σε κινδύνους από την κλιματική αλλαγή που σχετίζονται με το νερό και ενδεικτικές επιπτώσεις στην υγεία	19
Σχήμα 7 Καταγεγραμμένα πλημμυρικά γεγονότα στην Ευρώπη το 2024	20
Σχήμα 8 Οφέλη και συν-οφέλη των Λύσεων Βασισμένων στη Φύση.....	30
Σχήμα 9 Συνδυασμός NBS και γκρίζων υποδομών στο πλαίσιο της αποτελεσματικής διαχείρισης ομβρίων υδάτων.....	31
Σχήμα 10 Παράγοντες που διαμορφώνουν τις προτιμήσεις στο φάσμα των πράσινων – υβριδικών – γκρίζων υποδομών για τη μείωση του υδρομετεωρολογικού κινδύνου	32
Σχήμα 11 50χρόνια εξέλιξης της έννοιας των Λύσεων Βασισμένων στη Φύση	34
Σχήμα 12 Χρονολόγηση και έτος προέλευσης κάθε όρου (LIDs, BMPs, WSUD, GI, SuDs, NBSs, EbA, Eco-DRR και BGI) βάσει της πρώτης τους εμφάνισης στις επιστημονικές δημοσιεύσεις	36
Σχήμα 13 Σχέση NBS με υφιστάμενες συγγενείς προσεγγίσεις	38
Σχήμα 14 Εννοιολογική απεικόνιση των τριών τύπων NBS ως προς τον βαθμό μηχανικής παρέμβασης στα οικοσυστήματα, τον αριθμό των στοχευόμενων υπηρεσιών οικοσυστήματος και ομάδων ενδιαφερόμενων μερών, καθώς και τη δυνατότητα μεγιστοποίησης της παροχής βασικών υπηρεσιών.	41
Σχήμα 15 Νέα ιεραρχική ταξινόμηση των εξεταζόμενων NBS.....	45
Σχήμα 16 Απορροή, διήθηση, αποθήκευση, εξάτμιση.	46
Σχήμα 17 Συμπληρωματικά οφέλη που εντοπίστηκαν σε μελέτες περίπτωσης, πέραν του πρωταρχικού οφέλους της μείωσης του κινδύνου πλημμυρών από την εφαρμογή NbS. (α) Αριθμός άρθρων που ανέφεραν, ποσοτικοποίησαν ή δεν ανέφεραν τα συμπληρωματικά οφέλη·(β) Γραφική απεικόνιση των επιμέρους συμπληρωματικών οφελών που καταγράφηκαν..	57

Σχήμα 18	Μεθοδολογικό πλαίσιο για την αξιολόγηση της αποδοτικότητας των NBS με βάση προσομοιώσεων και αριθμητικών αναλύσεων.	62
Σχήμα 19	Διαδικασία αξιολόγησης NBS η οποία περιλαμβάνει την επιλογή των πιθανών μέτρων NBS, την αξιολόγηση καθώς και την βελτιστοποίηση της απόδοσής τους με τη χρήση διαθέσιμων εργαλείων.	65
Σχήμα 20	Αποτελεσματικότητα διαφορετικών μικρής κλίμακας NBS για διάφορες περιόδους επαναφοράς (BR: βιοκατακράτηση, GR: πράσινη στέγη, RB: δεξαμενή συλλογής όμβριων, IT: τάφος διήθησης).	87
Σχήμα 21	Υδρογραφήματα πλημμύρας πριν και μετά την εφαρμογή NBS υπό τις τρέχουσες κλιματικές συνθήκες.	91
Εικόνα 1	Πλατεία νερού Benthemplein στο Ρότερνταμ 104	104
Εικόνα 2	Πάρκο στην Κοπενχάγη που έχει διαμορφωθεί έτσι ώστε να συγκρατεί την περίσσεια νερού στο επίπεδο του εδάφους 104	104
Εικόνα 3	Σχεδιασμός οδού κατακράτησης ομβρίων στην Κοπενχάγη (άνω εικόνα), η οποία έχει σχεδιαστεί ώστε να μετατρέπεται σε ανοιχτό υδάτινο σώμα κατά τη διάρκεια έντονων βροχοπτώσεων (κάτω εικόνα) 105	105
Εικόνα 4	Αστικός σχεδιασμός “City in a Garden” ενσωματώνοντας NBS στη Σιγκαπούρη 106	106
Εικόνα 5	Υλοποίηση εφαρμογής χαρτογράφησης ενσωματώνοντας NBS στο πλαίσιο διαδικτυακής στρατηγικής ενίσχυσης πράσινων έργων υποδομών στη Νέα Υόρκη 107	107
Εικόνα 6	Υλοποίηση εφαρμογής χαρτογράφησης ενσωματώνοντας NBS στο πλαίσιο διαδικτυακής στρατηγικής ενίσχυσης πράσινων έργων υποδομών στη Νέα Υόρκη 108	108
Εικόνα 7	Οι 11 τομείς στους οποίους αξιοποιείται η φύση ως βασικό στοιχείο προσφοράς προϊόντων ή/και υπηρεσιών στο πλαίσιο του ερευνητικού προγράμματος Connecting Nature (..... 110	110
Εικόνα 8	Δραστηριότητες του ερευνητικού προγράμματος Nature4Cities 111	111
Εικόνα 9	Ενσωμάτωση των NBS στον μακροπρόθεσμο αστικό σχεδιασμό, την ανάπτυξη και τη διαχείριση των πόλεων, συμβάλλοντας στη δημιουργία αρμονίας μεταξύ κοινωνίας, οικονομίας και περιβάλλοντος προς όφελος του συνόλου. 112	112
Εικόνα 10	Διαφορετικοί τύποι δεδομένων που απαιτούνται για τις επτά πιλοτικές μελέτες στην Ευρώπη στο πλαίσιο της διερεύνησης μετριασμού των επιπτώσεων της ξηρασίας 113	113
Εικόνα 11	Συνήθεις τύποι μπλε και πράσινων υποδομών. 114	114
Εικόνα 12	Χώρος πρασίνου στο κάτω κεντρικό τμήμα της εικόνας: η περιοχή η οποία πρόκειται να φιλοξενήσει το νέο «Sponge Park» στην πόλη των Τρικάλων (αριστερά) 119	119
Εικόνα 13	Πρώην στρατόπεδο Παύλου Μελά: σημερινή κατάσταση (αριστερά) 121	121

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1 Κατάλογος παραγόντων που συμβάλλουν στην εκδήλωση πλημμυρών.	22
Πίνακας 2 Λεξιλόγιο όρων και η γεωγραφική τους χρήση.....	35
Πίνακας 3 Κοινός κατάλογος NBS και των αντίστοιχων ομαδοποιημένων / συσχετισμένων NBS (οι οποίες θεωρήθηκαν παρόμοιες ή ισοδύναμες μεταξύ των ερευνητικών προγραμμάτων URBANGREENUP GU, UNALAB UNL, NATURE4CITIES N4C και THINKNATURE TN).	43
Πίνακας 4 Συνήθεις περιορισμοί και παράγοντες που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη και επηρεάζουν την αποτελεσματικότητα των NBS για τη μείωση του κινδύνου πλημμυρών.	60
Πίνακας 5 Μελέτες εφαρμογής NBS για τη διαχείριση ομβρίων υδάτων σε αστικά περιβάλλοντα από τη διεθνή βιβλιογραφία.....	78
Πίνακας 6 Τεχνική απόδοση των επτά σεναρίων εφαρμογής NBS.....	83
Πίνακας 7 Αποτελέσματα της ανάλυσης του λόγου κόστους – αποτελεσματικότητας.....	83
Πίνακας 8 Τιμές αιχμής παροχής ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) και όγκου απορροής (mm) στην έξοδο της αστικής υπολεκάνης για κάθε περίοδο επαναφοράς (T), στο υφιστάμενο σενάριο (χωρίς NBS) και μετά την υλοποίηση των NBS, όπως προέκυψαν από την προσομοίωση με το μοντέλο EPA SWMM.....	96
Πίνακας 9 Τιμές αιχμής παροχής ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) και πλημμυρικής έκτασης (km^2) στην έξοδο της λεκάνης απορροής Toscano για κάθε περίοδο επαναφοράς (T), στο υφιστάμενο σενάριο (χωρίς εφαρμογή NBS) και κατόπιν μεταβολής του αριθμού καμπύλης (CN), όπως προέκυψαν από την προσομοίωση με το μοντέλο HEC-RAS.....	96
Πίνακας 10 Σύνοψη σημαντικών ερευνητικών προγραμμάτων που πραγματοποιούνται τη χρήση των NBS στη διαχείριση ομβρίων υδάτων	117

Συντομογραφίες & Ακρωνύμια

BGI	Μπλε και Πράσινη Υποδομή (Blue and Green Infrastructure)
BI	Μπλε Υποδομή (Blue Infrastructure)
BMP	Βέλτιστες Πρακτικές Διαχείρισης (Best Management Practices)
CN	Αριθμός Καμπύλης Απορροής (Curve Number)
DEM	Ψηφιακά Μοντέλα Εδάφους (Digital Elevation Models)
EbA	Προσαρμογή στην Κλιματική Αλλαγή βασισμένη στα Οικοσυστήματα (Ecosystem-based Adaptation)
Eco-DRR	Μείωση του Κινδύνου Καταστροφών Βασισμένη στα Οικοσυστήματα (Ecosystem-based Disaster Risk Reduction)
EE	Οικολογική Μηχανική (Ecological Engineering)
EEA	Ευρωπαϊκός Οργανισμός Περιβάλλοντος (European Environmental Agency)
EPA SWMM	Storm Water Management Model της Υπηρεσίας Προστασίας Περιβάλλοντος των ΗΠΑ (Environmental Protection Agency Storm Water Management Model)
EPA	Υπηρεσία Προστασίας Περιβάλλοντος των Ηνωμένων Πολιτειών (U.S. Environmental Protection Agency)
ESS	Υπηρεσίες Οικοσυστήματος (Ecosystem Services)
GI	Πράσινες Υποδομές (Green Infrastructure)
GIS	Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών (Geographic Information Systems)
HEC-RAS	Hydraulic Engineering Center – River Analysis System
ICLEI	Τοπικές Κυβερνήσεις για τη Βιωσιμότητα (Local Governments for Sustainability)
IDF	Καμπύλες Έντασης–Διάρκειας–Συχνότητας (Intensity-Duration-Frequency)

IPCC	Διακυβερνητική Επιτροπή για την κλιματική αλλαγή (Intergovernmental Panel on Climate Change)
IUCN	Διεθνής Ένωση για τη Διατήρηση της Φύσης (International Union for Conservation of Nature)
LID	Ανάπτυξη Χαμηλής Περιβαλλοντικής Επίπτωσης (Low Impact Development)
L-THIA-LID	Long-Term Hydrologic Impact Assessment – Low Impact Development
NBS	Λύσεις Βασισμένες στη Φύση (Nature-Based Solutions)
SC	«Πόλη Σφουγγάρι» (“Sponge City”)
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition
SUDS	Συστήματα Βιώσιμης Αποστράγγισης (Sustainable Drainage System)
UNDRR	Γραφείο των Ηνωμένων Εθνών για τη Μείωση του Κινδύνου Καταστροφών (United Nations Office for Disaster Risk Reduction)
UrbanBEATS	Urban Biophysical Environments and Technologies Simulator
USGS	Γεωλογική Υπηρεσία των Ηνωμένων Πολιτειών (U.S. Geological Survey)
WSUD	Υδρολογικά Ευαίσθητος Αστικός Σχεδιασμός (Water Sensitive Urban Design)

1. Εισαγωγή

1.1 Αντικείμενο και σημασία της έρευνας

Η διαχείριση των ομβρίων υδάτων στις αστικές περιοχές αποτελεί ένα από τα πλέον σύνθετα και κρίσιμα ζητήματα του σύγχρονου πολεοδομικού και περιβαλλοντικού σχεδιασμού. Η αυξανόμενη ένταση και συχνότητα των πλημμυρικών φαινομένων συνδέεται άμεσα με την κλιματική αλλαγή, την ταχεία και συχνά άναρχη αστικοποίηση, καθώς και με τη διαρκή αύξηση των αδιαπέραστων επιφανειών. Οι μεταβολές αυτές διαταράσσουν τον φυσικό υδρολογικό κύκλο, οδηγώντας σε αυξημένες αιχμές απορροής, μειωμένη διήθηση και σημαντική επιβάρυνση των υφιστάμενων συστημάτων αποχέτευσης ομβρίων. Οι συνέπειες είναι πολυδιάστατες, καθώς επηρεάζουν την ανθρώπινη ασφάλεια, τις τεχνικές υποδομές, την οικονομική δραστηριότητα και, ευρύτερα, τη βιωσιμότητα των αστικών συστημάτων.

Τα τελευταία χρόνια, η επιστημονική έρευνα στρέφεται ολοένα και περισσότερο στην ανάπτυξη ολοκληρωμένων και πολυκριτηριακών μοντέλων διαχείρισης ομβρίων υδάτων, τα οποία δεν περιορίζονται στην απλή απομάκρυνση των υδάτων, αλλά εντάσσονται στο ευρύτερο πλαίσιο του αστικού υδρολογικού κύκλου. Στο πλαίσιο αυτό, αναδεικνύεται μια μετατόπιση από τις αποκλειστικά τεχνικές, μονολειτουργικές λύσεις προς προσεγγίσεις που επιδιώκουν την αποκατάσταση, έστω και μερικώς, των φυσικών διεργασιών απορροής, διήθησης και καθαρισμού των υδάτων. Η κατεύθυνση αυτή συνοδεύεται από την αυξανόμενη αναγνώριση ότι η επαναφορά της υδατικής ισορροπίας στις πόλεις συμβάλλει στη δημιουργία υγιέστερων και περισσότερο ανθεκτικών αστικών περιβαλλόντων.

Στο πλαίσιο αυτό, οι Λύσεις Βασισμένες στη Φύση (Nature-Based Solutions – NBS) αναδεικνύονται ως μια εναλλακτική ή συμπληρωματική προσέγγιση των συμβατικών «γκρίζων» υποδομών, παρουσιάζοντας ιδιαίτερη δυναμική. Οι λύσεις αυτές αξιοποιούν φυσικές ή ημιφυσικές διεργασίες για τη διαχείριση των ομβρίων, συνδυάζοντας τη μείωση του πλημμυρικού κινδύνου με πρόσθετα περιβαλλοντικά, κοινωνικά και αισθητικά οφέλη. Ωστόσο, παρά το αυξανόμενο ενδιαφέρον για την εφαρμογή τους, παραμένει αναγκαία η

συστηματική και επιστημονικά τεκμηριωμένη αξιολόγηση της πραγματικής τους αποτελεσματικότητας, ιδίως σε διαφορετικά αστικά και κλιματικά πλαίσια.

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ενσωμάτωση των Λύσεων Βασισμένων στη Φύση σε ένα μεθοδολογικό πλαίσιο διαχείρισης ομβρίων υδάτων σε αστικά περιβάλλοντα. Η έρευνα αποσκοπεί αφενός στην αντιμετώπιση του πλημμυρικού κινδύνου και αφετέρου στη συμβολή στη βελτίωση της ποιότητας ζωής, στο πλαίσιο μιας βιώσιμης και ανθεκτικής αστικής ανάπτυξης. Ειδικότερα, διερευνάται κατά πόσο και σε ποιο βαθμό οι NBS μπορούν να μειώσουν τον πλημμυρικό κίνδυνο, αποκαθιστώντας βασικές υδρολογικές διεργασίες, ενώ ταυτόχρονα παρέχουν πολλαπλά περιβαλλοντικά και κοινωνικά οφέλη.

Η σημασία της έρευνας έγκειται στο γεγονός ότι το εξεταζόμενο πρόβλημα είναι σύγχρονο, πολυδιάστατο και διαρκώς εντεινόμενο. Οι παραδοσιακές προσεγγίσεις που βασίζονται στην αύξηση της παροχτετευτικής ικανότητας των «γκρίζων» υποδομών μέσω επεκτάσεων και αναβαθμίσεων του δικτύου αποχέτευσης καθίστανται ολοένα και πιο δαπανηρές και συχνά ανεπαρκείς, ιδίως σε πυκνοδομημένες περιοχές. Επιπλέον, οι λύσεις αυτές δεν ευθυγραμμίζονται πλήρως με τους σύγχρονους στόχους της βιώσιμης αστικής ανάπτυξης, οι οποίοι απαιτούν πολυλειτουργικές παρεμβάσεις με περιβαλλοντική και κοινωνική προστιθέμενη αξία. Αντίθετα, οι Λύσεις Βασισμένες στη Φύση προσφέρουν μια ολοκληρωμένη προσέγγιση, καθώς στοχεύουν ταυτόχρονα στη ρύθμιση του υδρολογικού καθεστώτος, στη βελτίωση της ποιότητας των υδάτων, στην ενίσχυση της αστικής βιοποικιλότητας, στη βελτίωση του μικροκλίματος και, τελικά, στην αναβάθμιση της ποιότητας ζωής των κατοίκων. Η διερεύνηση και τεκμηρίωση της αποτελεσματικότητάς τους αποτελεί κρίσιμη προϋπόθεση για την ευρύτερη υιοθέτησή τους στον αστικό σχεδιασμό.

1.2 Σκοπός και στόχοι της διπλωματικής εργασίας

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση της συμβολής των Λύσεων Βασισμένων στη Φύση στη μείωση του πλημμυρικού κινδύνου σε αστικά περιβάλλοντα, μέσω μιας ολοκληρωμένης προσέγγισης διαχείρισης ομβρίων υδάτων. Η

έρευνα επιδιώκει να αξιολογήσει την αποτελεσματικότητα των NBS, λαμβάνοντας υπόψη τόσο τις υδρολογικές τους επιδόσεις όσο και τις ευρύτερες περιβαλλοντικές, κοινωνικές και οικονομικές παραμέτρους.

Ειδικότερα, οι βασικοί στόχοι της εργασίας είναι οι ακόλουθοι:

- Η αξιολόγηση της υδρολογικής απόδοσης των NBS, με έμφαση στη μείωση της αιχμής της απορροής, στον περιορισμό του συνολικού όγκου απορροής και στην αύξηση του χρόνου συγκέντρωσης, παράμετροι που σχετίζονται άμεσα με τη μείωση της έντασης και της επικινδυνότητας των πλημμυρικών φαινομένων.
- Η διερεύνηση της συμβολής των NBS στη βελτίωση της ποιότητας των ομβρίων υδάτων, μέσω μηχανισμών συγκράτησης ρύπων, αιωρούμενων στερεών και θρεπτικών φορτίων, αναδεικνύοντας τον διττό ρόλο της διαχείρισης ομβρίων τόσο ως ποσοτικού όσο και ως ποιοτικού ζητήματος.
- Η αξιολόγηση της προσαρμοστικότητας και της καταλληλότητας των λύσεων αυτών στον αστικό ιστό, λαμβάνοντας υπόψη χωρικούς περιορισμούς, υφιστάμενες υποδομές και χαρακτηριστικά χρήσεων γης.
- Η ανάδειξη των πολλαπλών ωφελειών των NBS, όπως η ενίσχυση της αστικής βιοποικιλότητας, η βελτίωση του μικροκλίματος και η αναβάθμιση της ποιότητας ζωής, τα οποία συνιστούν βασικό πλεονέκτημα έναντι των συμβατικών τεχνικών παρεμβάσεων.
- Η εξέταση της λειτουργικής και οικονομικής βιωσιμότητας των NBS, συμπεριλαμβανομένων ζητημάτων κόστους, συντήρησης και μακροχρόνιας απόδοσης, δεδομένου ότι η αποτελεσματικότητά τους εξαρτάται από τη συνεχή και ορθή λειτουργία τους.

Η επιλογή των παραπάνω στόχων αποσκοπεί στη συνολική και πολυδιάστατη αποτίμηση των Λύσεων Βασισμένων στη Φύση, αναγνωρίζοντας ότι η συμβολή τους υπερβαίνει τη στενή αντιμετώπιση του πλημμυρικού κινδύνου και εντάσσεται σε ένα ευρύτερο πλαίσιο βιώσιμης αστικής διαχείρισης.

1.3 Μεθοδολογική προσέγγιση

Η μεθοδολογία της εργασίας βασίζεται σε εκτενή ανασκόπηση της διεθνούς βιβλιογραφίας, σε κριτική εξέταση επιλεγμένων μελετών περίπτωσης και στην ανάπτυξη ενός πολυκριτηριακού πλαισίου αξιολόγησης.

Το πλαίσιο αυτό ενσωματώνει υδρολογικούς δείκτες, παραμέτρους ποιότητας νερού και κριτήρια βιωσιμότητας, προκειμένου να αποτυπωθεί η απόδοση των NBS όχι μόνο ως προς την αντιπλημμυρική τους λειτουργία, αλλά και ως προς τη συνολικότερη συνεισφορά τους στη βιώσιμη αστική διαχείριση. Ιδιαίτερη έμφαση αποδίδεται στη μείωση της αιχμής της απορροής, στον περιορισμό του συνολικού όγκου απορροής, στην αύξηση του χρόνου συγκέντρωσης και στην ικανότητα συγκράτησης και απομάκρυνσης ρύπων.

Για την αποτίμηση της υδρολογικής και υδραυλικής συμπεριφοράς των λύσεων προτείνεται η αξιοποίηση υδρολογικών και υδραυλικών μοντέλων προσομοίωσης μέσω των οποίων εξετάζονται διαφορετικά σενάρια βροχόπτωσης και περίοδοι επαναφοράς. Η αξιολόγηση στηρίζεται σε ποσοτικούς δείκτες, όπως η μείωση της αιχμής παροχής, ο περιορισμός του συνολικού όγκου απορροής, η αύξηση του χρόνου συγκέντρωσης και η ικανότητα συγκράτησης ρύπων και αιωρούμενων στερεών. Παράλληλα, λαμβάνονται υπόψη κριτήρια βιωσιμότητας, λειτουργικής προσαρμοστικότητας και κόστους–αποτελεσματικότητας.

1.4 Δομή της διπλωματικής εργασίας

Η διπλωματική εργασία αποτελείται από τα ακόλουθα κεφάλαια:

Το Κεφάλαιο 1 αποτελεί την εισαγωγή της διπλωματικής εργασίας και θέτει το γενικό πλαίσιο μέσα στο οποίο αναπτύσσεται η έρευνα. Αρχικά, παρουσιάζεται το αντικείμενο της μελέτης και τεκμηριώνεται η σημασία του, με έμφαση στις σύγχρονες προκλήσεις που αντιμετωπίζουν τα αστικά περιβάλλοντα στη διαχείριση των ομβρίων υδάτων και στον αυξανόμενο πλημμυρικό κίνδυνο. Στη συνέχεια διατυπώνεται ο σκοπός της διπλωματικής εργασίας και προσδιορίζονται οι επιμέρους στόχοι της, οι οποίοι καθοδηγούν τη συνολική ερευνητική διαδικασία. Τέλος, περιγράφεται συνοπτικά η μεθοδολογική προσέγγιση που

ακολουθείται, παρουσιάζοντας τα βασικά στάδια της έρευνας και τα εργαλεία που χρησιμοποιούνται για την επίτευξη των στόχων της μελέτης.

Το Κεφάλαιο 2 εστιάζει στο θεωρητικό υπόβαθρο και την ανασκόπηση της σχετικής βιβλιογραφίας. Αρχικά παρουσιάζεται ο υδρολογικός κύκλος, με έμφαση στις βασικές έννοιες και διεργασίες που τον διέπουν, καθώς και στις μεταβολές που υφίσταται στο πλαίσιο της αστικοποίησης. Αναλύεται ο τρόπος με τον οποίο η αύξηση των αδιαπέρατων επιφανειών και οι ανθρωπογενείς παρεμβάσεις επηρεάζουν την απορροή, τη διήθηση και την αποθήκευση του νερού. Στη συνέχεια εξετάζεται ο πλημμυρικός κίνδυνος σε αστικά περιβάλλοντα, παρουσιάζοντας τις βασικές έννοιες, το ισχύον θεσμικό και νομικό πλαίσιο, καθώς και τη συσχέτιση του πλημμυρικού κινδύνου με την κλιματική αλλαγή. Δίνεται ειδικότερα έμφαση στις αστικές πλημμύρες και στην έννοια της ανθεκτικότητας των πόλεων, αναδεικνύοντας την ανάγκη για ολοκληρωμένες και προσαρμοστικές στρατηγικές διαχείρισης. Ακολούθως, παρουσιάζονται οι συμβατικές προσεγγίσεις διαχείρισης ομβρίων υδάτων, γνωστές ως «γκρι» υποδομές, με ανάλυση των πλεονεκτημάτων και των περιορισμών τους. Γίνεται εισαγωγή στις σύγχρονες προσεγγίσεις διαχείρισης, δίνοντας έμφαση στον υδρολογικά ευαίσθητο αστικό σχεδιασμό και στις Λύσεις Βασισμένες στη Φύση (Nature Based Solutions). Παρουσιάζονται οι βασικές αρχές των NBS, καθώς και η συνδυαστική εφαρμογή τους με τις συμβατικές υποδομές στο πλαίσιο μιας ολοκληρωμένης διαχείρισης ομβρίων υδάτων.

Το Κεφάλαιο 3 επικεντρώνεται αποκλειστικά στις Λύσεις Βασισμένες στη Φύση. Αρχικά, αναλύονται οι εννοιολογικές σχέσεις και διασυνδέσεις των NBS με συναφείς έννοιες και προσεγγίσεις. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται η κατηγοριοποίηση και η τυπολογία των NBS, καθώς και οι βασικοί μηχανισμοί λειτουργίας τους, όπως η διήθηση, η αποθήκευση και η εξατμισοδιαπνοή. Επιπλέον, εξετάζεται η υδρολογική και υδραυλική τους απόδοση, τα περιβαλλοντικά και κοινωνικά οφέλη που προσφέρουν, αλλά και οι περιορισμοί και οι προκλήσεις που συνοδεύουν την εφαρμογή τους σε αστικά περιβάλλοντα.

Το Κεφάλαιο 4 παρουσιάζει το προτεινόμενο μεθοδολογικό πλαίσιο για τη διαχείριση των ομβρίων υδάτων μέσω της εφαρμογής Λύσεων Βασισμένων στη Φύση. Περιγράφονται τα επιμέρους στάδια της μεθοδολογίας, τα κριτήρια επιλογής των κατάλληλων λύσεων και η διαδικασία αξιολόγησης της αποτελεσματικότητάς τους.

Το Κεφάλαιο 5 επικεντρώνεται στη διεθνή εμπειρία και στις εφαρμογές των NBS σε αστικά περιβάλλοντα. Παρουσιάζονται χαρακτηριστικά παραδείγματα από τον διεθνή χώρο, αναδεικνύοντας καλές πρακτικές, αποτελέσματα εφαρμογής και διδάγματα που μπορούν να αξιοποιηθούν στον ελληνικό ή ευρύτερο ευρωπαϊκό αστικό χώρο.

Τέλος, το Κεφάλαιο 6 συνοψίζει και συνθέτει τα βασικά ευρήματα της διπλωματικής εργασίας, αποτυπώνοντας τα κύρια συμπεράσματα που προκύπτουν από τη θεωρητική ανάλυση, τη μεθοδολογική εφαρμογή και την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων. Παράλληλα, αναγνωρίζονται και συζητούνται οι περιορισμοί της έρευνας, οι οποίοι σχετίζονται με τις διαθέσιμες παραδοχές, τα δεδομένα και το εύρος της ανάλυσης. Τέλος, διατυπώνονται προτάσεις για μελλοντική έρευνα, αναδεικνύοντας δυνατότητες περαιτέρω διερεύνησης και βελτίωσης της εφαρμογής των Λύσεων Βασισμένων στη Φύση στη διαχείριση των ομβρίων υδάτων και στην ενίσχυση της ανθεκτικότητας των αστικών περιβαλλόντων.

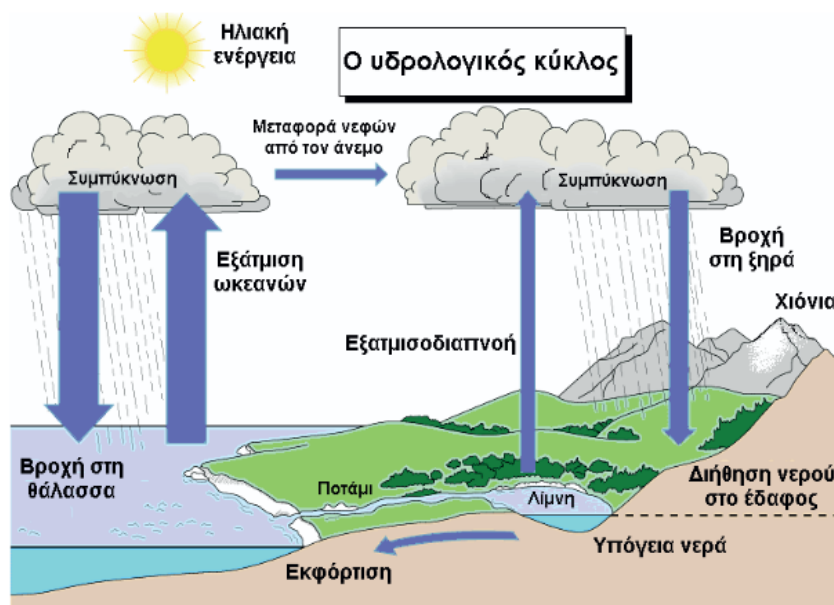
2. Θεωρητικό υπόβαθρο και ανασκόπηση βιβλιογραφίας

2.1 Υδρολογικός κύκλος και μεταβολές του σε αστικά περιβάλλοντα

2.1.1 Βασικές έννοιες και διεργασίες

Ο υδρολογικός κύκλος περιγράφει τη συνεχή κυκλοφορία του νερού μεταξύ της επιφάνειας της Γης, της ατμόσφαιρας και των υπόγειων στρωμάτων, μέσω φυσικών διεργασιών όπως η εξάτμιση, η διαπνοή, η συμπύκνωση, οι κατακρημνίσεις, η απορροή και η διήθηση. Αποτελεί θεμελιώδη μηχανισμό για τη διατήρηση της ζωής και λειτουργεί αδιάλειπτα επί δισεκατομμύρια χρόνια (Chow et al., 1988; Μακρόπουλος & Κουτσογιάννης, 2016).

Η ηλιακή ακτινοβολία αποτελεί την κινητήρια δύναμη του κύκλου, προκαλώντας την εξάτμιση του νερού από τους ωκεανούς, τα επιφανειακά υδατικά σώματα και το έδαφος, καθώς και τη διαπνοή των φυτών, διαδικασίες που συνολικά ορίζονται ως εξατμοδιαπνοή. Οι υδρατμοί ανέρχονται στα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας, όπου λόγω πτώσης της θερμοκρασίας συμπυκνώνονται και σχηματίζουν νέφη. Η περαιτέρω αύξηση του μεγέθους των υδροσταγονιδίων οδηγεί σε κατακρημνίσεις, με τη βροχή να αποτελεί τη συνηθέστερη μορφή τους (Σχήμα 1).



Σχήμα 1 Σχηματική αναπαράσταση του υδρολογικού κύκλου χωρίς την επιρροή του ανθρώπινου

παράγοντα (Νταρακάς, 2016)

Κεντρική έννοια στην ανάλυση του υδρολογικού κύκλου αποτελεί το υδρολογικό ισοζύγιο, το οποίο εκφράζει τη διατήρηση της μάζας του νερού σε ένα καθορισμένο σύστημα και χρονικό διάστημα. Σύμφωνα με το υδρολογικό ισοζύγιο, η συνολική ποσότητα των κατακρημνίσεων κατανέμεται μεταξύ εξατμοδιαπνοής, επιφανειακής απορροής και διήθησης, ενώ οι μεταβολές στην αποθήκευση του νερού στο έδαφος, στα επιφανειακά υδατικά σώματα και στους υπόγειους υδροφορείς αποτελούν επίσης σημαντικό παράγοντα (Singh, 1992). Η ποσοτική αυτή προσέγγιση αποτελεί βασικό εργαλείο της υδρολογικής επιστήμης.

Οι κατακρημνίσεις συνιστούν τον κύριο μηχανισμό επαναφοράς του νερού από την ατμόσφαιρα στην επιφάνεια της Γης και εκδηλώνονται με διάφορες μορφές, όπως βροχή, χιόνι και χαλάζι. Η ένταση, η διάρκεια και η χωρική κατανομή των κατακρημνισμάτων επηρεάζουν καθοριστικά την υδρολογική απόκριση μιας περιοχής. Η βροχύπτωση, ως η συνηθέστερη μορφή κατακρήμνισης, αποτελεί το βασικό ερέθισμα για την ενεργοποίηση των διεργασιών απορροής και διήθησης (Viessman & Lewis, 2003).

Οι κατακρημνίσεις που φθάνουν στην επιφάνεια της στεριάς είτε κινούνται επιφανειακά σχηματίζοντας απορροή είτε διηθούνται στο έδαφος, εμπλουτίζοντας τα υπόγεια υδατικά αποθέματα. Η επιφανειακή απορροή μεταφέρεται κυρίως μέσω των ποταμών προς τη θάλασσα, ενώ μέρος της μπορεί να συγκρατηθεί προσωρινά σε λίμνες. Το ποσοστό της απορροής επηρεάζεται από παράγοντες όπως η ένταση της βροχύπτωσης, η γεωλογία, το ανάγλυφο, η κάλυψη γης και ο βαθμός διαπερατότητας του εδάφους. Εκτιμάται ότι περίπου το ένα τρίτο των κατακρημνισμάτων καταλήγει στα υδατορεύματα, ενώ το υπόλοιπο εξατμίζεται ή διηθείται (Μακρόπουλος & Κουτσογιάννης, 2016).

Παράλληλα, σημαντικό τμήμα του νερού των κατακρημνισμάτων διεισδύει στο έδαφος μέσω της διαδικασίας της διήθησης, συμβάλλοντας στον εμπλουτισμό της εδαφικής υγρασίας και των υπόγειων υδροφορέων. Η διήθηση του νερού οδηγεί στον σχηματισμό υπόγειων υδάτων και στον διαχωρισμό του υπεδάφους σε ακόρεστη και κορεσμένη ζώνη. Στην ακόρεστη ζώνη οι πόροι περιέχουν τόσο αέρα όσο και νερό, ενώ στην κορεσμένη ζώνη όλοι οι πόροι είναι πλήρως πληρωμένοι με νερό, σχηματίζοντας τους υπόγειους υδροφορείς. Η διήθηση εξαρτάται από τη διαπερατότητα του εδάφους, τη δομή των

πόρων και την αρχική υγρασία του υπεδάφους. Το υπόγειο νερό αποθηκεύεται στην κορεσμένη ζώνη και μπορεί να παραμείνει εκεί για μεγάλα χρονικά διαστήματα, πριν εκφορτιστεί σταδιακά μέσω πηγών, ποταμών ή απευθείας στη θάλασσα (Σχήμα 2) (Freeze & Cherry, 1979).



Σχήμα 2 Σχηματισμός κορεσμένης και ακόρεστης ζώνης του εδαφικού σχηματισμού
(<https://www.usgs.gov/water-science-school/science/o-ydrologikos-kyklos-water-cycle-greek>)

Για την κατανόηση της λειτουργίας του υδρολογικού κύκλου, ιδιαίτερη σημασία έχει η έννοια της λεκάνης απορροής ενός ποταμού. Η λεκάνη απορροής αποτελεί τη βασική χωρική μονάδα ανάλυσης στην υδρολογία, καθώς εντός των ορίων της λαμβάνουν χώρα όλες οι διεργασίες που καθορίζουν την ποσότητα και τη χρονική εξέλιξη της απορροής. Ως λεκάνη απορροής ορίζεται η χερσαία περιοχή που περιλαμβάνει το ποτάμι, τους παραποτάμους του, καθώς και τα μικρότερα ρέματα που εκβάλλουν σε αυτό. Πιο συγκεκριμένα, για ένα συγκεκριμένο σημείο κατά μήκος ενός υδατορεύματος, λεκάνη απορροής θεωρείται η γεωγραφική περιοχή από την οποία προέρχονται τα νερά που συμβάλλουν στην απορροή η οποία διέρχεται από το σημείο αυτό. Κάθε μεγάλη λεκάνη απορροής μπορεί να υποδιαιρεθεί σε μικρότερες επιμέρους υπολεκάνες, καθεμία από τις οποίες αντιστοιχεί συνήθως σε έναν παραπόταμο ή σε τμήμα του υδρογραφικού δικτύου. Οι λεκάνες απορροής αποτελούν κρίσιμες μονάδες μελέτης, καθώς τόσο η ποσότητα όσο και η ποιότητα του νερού που φθάνει στα ποτάμια εξαρτώνται άμεσα από τις φυσικές διεργασίες και τις ανθρώπινες δραστηριότητες που λαμβάνουν χώρα εντός των ορίων τους (Μακρόπουλος & Κουτσογιάννης, 2016).

2.1.2 Αστικοποίηση και μεταβολές υδρολογικού κύκλου

Η διαδικασία της αστικοποίησης οδηγεί σε εκτεταμένη αύξηση των αδιαπέρατων επιφανειών, ενώ τα φυσικά υδατορέματα συχνά αντικαθίστανται από τεχνικά έργα, όπως υπόγεια δίκτυα αγωγών και ανοικτές τάφρους. Ως συνέπεια των παρεμβάσεων αυτών, παρατηρείται ενίσχυση της επιφανειακής απορροής και ταυτόχρονη μείωση της διήθησης, γεγονός που περιορίζει τον φυσικό εμπλουτισμό των υπόγειων υδροφορέων. Η σχέση μεταξύ κατακρημνισμάτων και επιφανειακής απορροής επηρεάζεται από πλήθος παραγόντων, όπως οι μετεωρολογικές συνθήκες, το ανάγλυφο και τα γεωλογικά χαρακτηριστικά της περιοχής, ενώ παρουσιάζει σημαντική χωρική και χρονική μεταβλητότητα.

Οι Savani et al. (1961) διερεύνησαν τη συσχέτιση της υδρολογικής απόκρισης με τις μεταβολές της φυτικής κάλυψης του εδάφους σε διαφορετικά στάδια αστικοποίησης, προσδιορίζοντας τέσσερις διακριτές φάσεις: αγροτική, ελαφρώς αστική, μετρίως αστική και πλήρως αστική. Κάθε στάδιο συνδέεται με χαρακτηριστικές διαφοροποιήσεις του υδρολογικού καθεστώτος.

Στο αγροτικό στάδιο, όπου το φυσικό τοπίο παραμένει σε μεγάλο βαθμό αδιατάρακτο, κυρίαρχες διεργασίες του υδρολογικού κύκλου αποτελούν η διήθηση και η εξατμισοδιαπνοή. Κατά το ελαφρώς αστικό στάδιο, αναπτύσσονται εκτεταμένες περιοχές με μερική διατήρηση της φυσικής βλάστησης, ενώ οι αδιαπέρατες επιφάνειες αρχίζουν να επηρεάζουν περιορισμένα την υδρολογική συμπεριφορά των λεκανών απορροής. Στο μετρίως αστικό στάδιο, οι αδιαπέρατες επιφάνειες καθίστανται κυρίαρχες, με τις οικιστικές και εμπορικές χρήσεις γης να επικρατούν. Τέλος, στο πλήρως αστικό στάδιο, η φυσική βλάστηση σχεδόν εξαλείφεται και οι λεκάνες απορροής καλύπτονται σε μεγάλο βαθμό από αδιαπέρατα υλικά. Είναι χαρακτηριστικό ότι σε περιοχές με φυσική εδαφική κάλυψη μόνο περίπου το 10% της βροχόπτωσης μετατρέπεται σε επιφανειακή απορροή, ενώ σε αστικές περιοχές, όπου το ποσοστό του εδάφους που καλύπτεται από αδιαπέρατες επιφάνειες κυμαίνεται μεταξύ 75% και 100%, το αντίστοιχο ποσοστό μπορεί να φτάσει έως και το 50%.

Η αστικοποίηση μιας λεκάνης απορροής συνδέεται με αύξηση της παροχής αιχμής, μείωση του χρόνου συγκέντρωσης και αύξηση του συνολικού όγκου απορροής, κυρίως

λόγω της εκτεταμένης παρουσίας αδιαπέρατων επιφανειών (Campana και Tucci, 2001). Παράλληλα, οι αστικές περιοχές αναπτύσσουν ιδιαίτερες μικροκλιματικές συνθήκες, οι οποίες επιδρούν περαιτέρω στη λειτουργία του υδρολογικού κύκλου. Οι μεταβολές αυτές αποτυπώνονται χαρακτηριστικά στα υδρογραφήματα απορροής, τα οποία, σε αστικοποιημένες περιοχές, εμφανίζουν υψηλότερες παροχές αιχμής, μικρότερους χρόνους συγκέντρωσης και αυξημένο συνολικό όγκο πλημμύρας, σε σύγκριση με την προγενέστερη, μη αστική κατάσταση, για ισοδύναμα επεισόδια βροχόπτωσης (Μαραγκουδάκη & Τσακίρης, 2005).

Συνοψίζοντας, η μετάβαση από ένα φυσικό υδρολογικό καθεστώς, στο οποίο κυριαρχούν η διήθηση και η υπόγεια αποθήκευση, σε ένα αστικοποιημένο σύστημα με έμφαση στην επιφανειακή απορροή, συνεπάγεται σημαντικές υδρολογικές και περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Οι κυριότερες από αυτές περιλαμβάνουν: αυξημένο όγκο επιφανειακών απορροών, συχνότερη εμφάνιση πλημμυρικών φαινομένων, μειωμένη χρονική υστέρηση μεταξύ βροχόπτωσης και απορροής, υψηλότερες παροχές αιχμής για ισοδύναμα επεισόδια βροχόπτωσης, μεγαλύτερη διάρκεια υψηλών παροχών, ταχύτερη ύφεση των παροχών αιχμής, μείωση της βασικής ροής τόσο σε ξηρές όσο και σε υγρές περιόδους, περιορισμό του εμπλουτισμού των υπόγειων υδάτων και αυξημένη διακύμανση της στάθμης των υδάτων σε υδροτοπικά οικοσυστήματα (Βασιλοπούλου, 2017).

2.2 Πλημμυρικός κίνδυνος σε αστικά περιβάλλοντα

2.2.1 Βασικές έννοιες και ισχύον νομικό πλαίσιο

Ο πλημμυρικός κίνδυνος (flood risk) ορίζεται ως η πιθανότητα εκδήλωσης πλημμυρικού γεγονότος σε συνδυασμό με τις δυνητικές αρνητικές επιπτώσεις του σε ανθρώπους, υποδομές, οικονομικές δραστηριότητες, περιβάλλον και πολιτιστική κληρονομιά.

Στη διεθνή βιβλιογραφία ο πλημμυρικός κίνδυνος προσδιορίζεται από την αλληλεπίδραση τριών βασικών συνιστωσών, ήτοι της πλημμυρικής επικινδυνότητας, της έκθεσης και της τρωτότητας και εκφράζεται εννοιολογικά μέσω της σχέσης:

$$\text{Πλημμυρικός Κίνδυνος} = \text{Επικινδυνότητα} \times \text{Έκθεση} \times \text{Τρωτότητα}$$

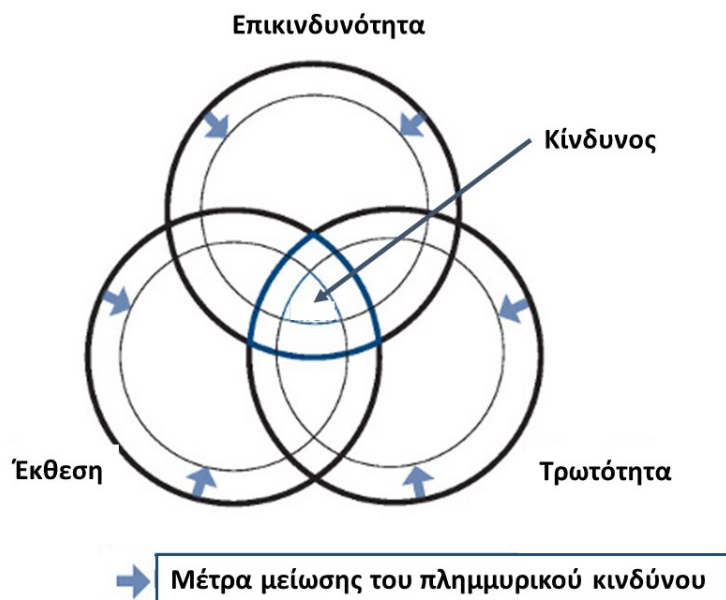
Η πλημμυρική επικινδυνότητα (flood hazard) αναφέρεται στη φυσική πιθανότητα εκδηλώσης και στην ένταση ενός πλημμυρικού γεγονότος σε συγκεκριμένο χωρικό και χρονικό πλαίσιο. Περιλαμβάνει παραμέτρους όπως η συχνότητα εμφάνισης, η οποία εκφράζεται συνήθως μέσω της περιόδου επαναφοράς, η ένταση του φαινομένου (βάθος νερού και ταχύτητα ροής), η διάρκεια και η χωρική έκταση της κατάκλυσης. Η επικινδυνότητα περιγράφει το καθαρά φυσικό σκέλος του φαινομένου και θεωρείται ανεξάρτητη από την παρουσία ή την επίδραση ανθρωπογενών παραγόντων.

Η έκθεση (exposure) αφορά την παρουσία και κατανομή ανθρωπογενών στοιχείων εντός περιοχών που είναι επιρρεπείς σε πλημμυρικά φαινόμενα, όπως ο πληθυσμός, οι κατοικίες και τα κτήρια, οι κρίσιμες υποδομές (οδικά δίκτυα, νοσοκομεία, δίκτυα κοινής ωφέλειας), οι οικονομικές δραστηριότητες και οι χρήσεις γης. Από τη μεταξύ τους σχέση προκύπτει ότι η εντατικοποίηση της αστικοποίησης, όταν συνεπάγεται αύξηση της έκθεσης, δύναται να οδηγήσει σε ενίσχυση του πλημμυρικού κινδύνου ακόμη και στην περίπτωση κατά την οποία η πλημμυρική επικινδυνότητα παραμένει αμετάβλητη.

Η τρωτότητα (vulnerability) εκφράζει τον βαθμό ευαισθησίας ή αδυναμίας των εκτεθειμένων στοιχείων να αντέξουν τις επιπτώσεις ενός πλημμυρικού γεγονότος και να ανακάμψουν από αυτές. Διακρίνεται σε δομική, κοινωνική, οικονομική και θεσμική τρωτότητα, αντανακλώντας τόσο φυσικά όσο και κοινωνικοοικονομικά χαρακτηριστικά του συστήματος. Η τρωτότητα συνδέεται άμεσα με την έννοια της ανθεκτικότητας, καθώς όσο υψηλότερο είναι το επίπεδο ανθεκτικότητας ενός συστήματος, τόσο χαμηλότερος είναι ο βαθμός τρωτότητάς του.

Ο πλημμυρικός κίνδυνος χαρακτηρίζεται από έντονη χωρική και χρονική μεταβλητότητα και επηρεάζεται τόσο από φυσικές διεργασίες όσο και από ανθρωπογενείς παράγοντες, όπως η αστικοποίηση και οι αλλαγές χρήσεων γης. Ο ποσοτικός του προσδιορισμός βασίζεται στη συνδυαστική ανάλυση υδρολογικών και υδραυλικών δεδομένων, στη χαρτογράφηση της έκθεσης μέσω γεωγραφικών συστημάτων πληροφοριών και στην εκτίμηση της τρωτότητας με τη χρήση δεικτών και καμπυλών βλαβών. Συχνά ο κίνδυνος εκφράζεται μέσω δεικτών ή κανονικοποιημένων μεγεθών, επιτρέποντας τη χωρική σύγκριση περιοχών και τη στήριξη τεκμηριωμένων αποφάσεων για τον σχεδιασμό μέτρων πρόληψης, προσαρμογής και ενίσχυσης της ανθεκτικότητας των αστικών περιοχών. Στο

Σχήμα 3 παρουσιάζεται η σχηματική απεικόνιση του πλημμυρικού κινδύνου και των βασικών συνιστωσών που τον ορίζουν.



Σχήμα 3 Σχηματική απεικόνιση των βασικών παραμέτρων που ορίζουν τον πλημμυρικό κίνδυνο
(<https://www.floodmanagement.info/what-is-flood-risk/>)

Το ισχύον θεσμικό πλαίσιο για την Ελλάδα και την Ευρώπη συνολικά είναι η Οδηγία 2007/60/EK που εισάγει μια ενιαία ευρωπαϊκή προσέγγιση στη διαχείριση του πλημμυρικού κινδύνου με έμφαση στην πρόληψη, προστασία και ετοιμότητα και σκοπό τη μείωση των αρνητικών συνεπειών που συνδέονται με τις πλημμύρες. Η Οδηγία εισάγει ένα ενιαίο και ολοκληρωμένο πλαίσιο διαχείρισης του πλημμυρικού κινδύνου σε επίπεδο λεκανών απορροής, βασισμένο σε τρία διαδοχικά στάδια: την προκαταρκτική αξιολόγηση του πλημμυρικού κινδύνου, τη σύνταξη χαρτών πλημμυρικής επικινδυνότητας και κινδύνου, και την εκπόνηση Σχεδίων Διαχείρισης Πλημμυρικού Κινδύνου. Μέσω της προσέγγισης αυτής, η Οδηγία προωθεί τη μετάβαση από την αποσπασματική αντιμετώπιση των πλημμυρών σε μια προληπτική και χωρικά τεκμηριωμένη διαχείριση, λαμβάνοντας υπόψη τόσο φυσικούς όσο και ανθρωπογενείς παράγοντες, καθώς και τη δυναμική μεταβολή του κινδύνου λόγω αστικοποίησης και κλιματικής αλλαγής.

Στο πλαίσιο της ολοκληρωμένης διαχείρισης του πλημμυρικού κινδύνου κρίνεται αναγκαία σύμφωνα με την Οδηγία η συστηματική εκπόνηση και θεσμοθέτηση χαρτών

πλημμυρικής επικινδυνότητας και χαρτών πλημμυρικού κινδύνου. Οι χάρτες αυτοί οφείλουν να αποτυπώνουν τις δυνητικές αρνητικές επιπτώσεις που σχετίζονται με διαφορετικά σενάρια εκδήλωσης πλημμυρικών φαινομένων, καθώς και να περιλαμβάνουν πληροφορίες σχετικά με πιθανές πηγές περιβαλλοντικής ρύπανσης που ενδέχεται να ενεργοποιηθούν ή να επιδεινωθούν ως αποτέλεσμα μιας πλημμύρας.

Περαιτέρω, η Οδηγία προβλέπει και την κατάρτιση Σχεδίων Διαχείρισης Πλημμυρικού Κινδύνου, με στόχο τη μείωση των δυσμενών επιπτώσεων των πλημμυρών στην ανθρώπινη υγεία, στο περιβάλλον, στην πολιτιστική κληρονομιά και στην οικονομική δραστηριότητα. Τα σχέδια αυτά οφείλουν να λαμβάνουν υπόψη τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των περιοχών που καλύπτουν, να καθορίζουν κατάλληλους στόχους διαχείρισης και να προτείνουν συνδυασμό δομικών και μη δομικών μέτρων, ανάλογα με τις ανάγκες και τις προτεραιότητες κάθε περιοχής. Επιπλέον, η εφαρμογή τους απαιτεί συντονισμένη προσέγγιση σε επίπεδο λεκάνης απορροής ποταμού, καθώς και συνέργεια με άλλες σχετικές ευρωπαϊκές πολιτικές, ιδίως με την Οδηγία-Πλαίσιο για τα Ύδατα, προκειμένου να διασφαλίζεται η επίτευξη των ευρύτερων περιβαλλοντικών στόχων της Ευρωπαϊκής Ένωσης.

2.2.2 Πλημμυρικός κίνδυνος και κλιματική αλλαγή

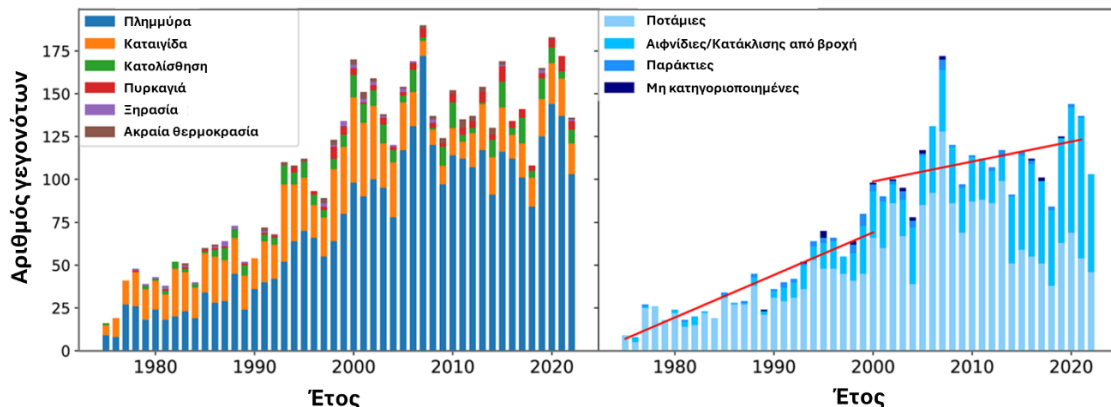
Η αξιολόγηση του δυνητικού πλημμυρικού κινδύνου προϋποθέτει τον εντοπισμό και την εις βάθος κατανόηση τριών θεμελιωδών μηχανισμών: της πηγής (το γενεσιουργό αίτιο του πλημμυρικού φαινομένου), του διαύλου μεταφοράς (οι διεργασίες και οι διαδρομές μέσω των οποίων εκδηλώνεται και κατευθύνεται η πλημμύρα) και του αποδέκτη (οι περιοχές, τα συστήματα ή οι πληθυσμοί που υφίστανται τις επιπτώσεις του φαινομένου (Κανδηλιώτη, 2009).

Όπως τεκμηριώνεται από την Γεωλογική Υπηρεσία των Ηνωμένων Πολιτειών (USGS – U.S. Geological Survey) διακρίνονται δύο βασικοί τύποι πλημμυρών: οι αιφνίδιες πλημμύρες (flash floods) και οι εκτεταμένες ποτάμιες πλημμύρες. Οι αιφνίδιες πλημμύρες συνδέονται, κατά κανόνα, με μεγαλύτερες απώλειες ανθρώπινων ζώων, ενώ οι ποτάμιες πλημμύρες προκαλούν προκαλούν συνήθως σημαντικότερες υλικές ζημιές.

Οι αιφνίδιες πλημμύρες εκδηλώνονται όταν η απορροή που προκύπτει από υπερβολική βροχόπτωση οδηγεί σε ταχεία άνοδο της στάθμης των υδάτων σε υδατορεύματα ή σε συνήθως ξηρές κοίτες. Το φαινόμενο εμφανίζεται συχνότερα σε περιοχές με ξηρό κλίμα και βραχώδες ανάγλυφο, όπου η περιορισμένη παρουσία εδάφους ή βλάστησης δεν επιτρέπει τη διήθηση των υδάτων, με αποτέλεσμα η έντονη βροχόπτωση να απορρέει επιφανειακά.

Αντίθετα, οι ποτάμιες πλημμύρες παρατηρούνται κυρίως σε μεγάλους ποταμούς και σε περιοχές με υγρότερο κλίμα, όταν η παρατεταμένη βροχόπτωση και, σε ορισμένες περιπτώσεις, η τήξη του χιονιού προκαλούν αυξημένη απορροή και σταδιακή άνοδο της στάθμης των υδάτων σε εκτεταμένες περιοχές. Πλημμυρικά φαινόμενα ενδέχεται επίσης να προκληθούν από παγοφράγματα σε ποτάμια ή από υψηλές παλίρροιες ωστόσο, η πλειονότητα των πλημμυρών μπορεί να συσχετιστεί με την εκδήλωση ακραίων μετεωρολογικών φαινομένων, και ιδίως με καταιγίδες (<https://www.usgs.gov/faqs/what-are-two-types-floods>).

Οι πλημμύρες θεωρούνται ένα από τα πιο συχνά εμφανιζόμενα φυσικά καταστροφικά φαινόμενα παγκοσμίως. Σύμφωνα με στατιστικά στοιχεία, οι πλημμύρες που προκαλούνται από έντονες βροχοπτώσεις αντιστοιχούν περίπου στο 40% των συνολικών παγκόσμιων απωλειών από φυσικές καταστροφές (Zhou et al., 2019). Σύμφωνα με την ελεύθερης πρόσβασης διεθνή βάση δεδομένων καταστροφών EM-DAT (The international disaster database) (<https://www.emdat.be/>) οι πλημμύρες αποτελούν, σε γενικές γραμμές, τον συχνότερο τύπο φυσικού φαινομένου που συνδέεται με έναν ή περισσότερους θανάτους, σε σύγκριση με άλλες φυσικές καταστροφές (βλ. Σχήμα 2.4, αριστερό διάγραμμα). Πιο συγκεκριμένα οι συνηθέστερες μορφές πλημμυρών είναι οι ποτάμιες και οι αιφνίδιες πλημμύρες (βλ. Σχήμα 4, δεξί διάγραμμα).



Σχήμα 4 Αριθμός καταστροφών (αριστερά) και αριθμός πλημμυρών (δεξιά) με μία ή περισσότερες απώλειες όπως καταγράφηκαν στη βάση EM-DAT για την περίοδο 1975-2022 (Jonkman et al., 2024)

Όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 5, η συχνότητα των παγκόσμιων πλημμυρικών καταστροφών έχει εμφανίσει ανοδική πορεία τις τελευταίες τρεις δεκαετίες (Li et al., 2022).



Σχήμα 5 Συχνότητα παγκόσμιων καταστροφών από πλημμύρες για το χρονικό διάστημα 1992 έως 2021 (Li et al., 2022)

Τα περιβαλλοντικά προβλήματα και τα ζητήματα ρύπανσης συγκαταλέγονται στις σημαντικότερες προκλήσεις του σύγχρονου κόσμου. Ιδιαίτερα η κλιματική αλλαγή αποτελεί ένα από τα πλέον εμφανή και επικίνδυνα περιβαλλοντικά προβλήματα, καθώς συνδέεται άμεσα με ανθρωπογενείς δραστηριότητες. Η περιβαλλοντική ρύπανση, η αύξηση της συγκέντρωσης των αερίων του θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα, η αποψίλωση

των δασών και η εντατικοποίηση των βιομηχανικών δραστηριοτήτων συμβάλλουν σε βραχυπρόθεσμες διακυμάνσεις και μακροπρόθεσμες μεταβολές της παγκόσμιας θερμοκρασίας.

Η κλιματική αλλαγή έχει συμβάλει σημαντικά στην ενίσχυση του πλημμυρικού κινδύνου, επηρεάζοντας τόσο τη συχνότητα όσο και την ένταση των πλημμυρικών φαινομένων. Ειδικότερα, παρατηρούνται μεταβολές στο καθεστώς των βροχοπτώσεων, με αύξηση της έντασης των ακραίων επεισοδίων κατακρημνίσεων, ακόμη και σε περιοχές όπου η συνολική ετήσια βροχόπτωση εμφανίζει πτωτική τάση. Παράλληλα, η πιθανότητα εκδήλωσης αιφνίδιων πλημμυρών έχει αυξηθεί, κυρίως στις αστικές περιοχές, λόγω της συνδυασμένης επίδρασης των κλιματικών μεταβολών και της εκτεταμένης στεγανοποίησης των επιφανειών.

Επιπλέον, η άνοδος της μέσης θερμοκρασίας της ατμόσφαιρας ενισχύει την περιεκτικότητά της σε υδρατμούς και επιταχύνει τη διαδικασία τήξης του χιονιού σε ορεινές και ημιορεινές περιοχές, γεγονός που οδηγεί σε αυξημένες επιφανειακές απορροές. Τέλος, η άνοδος της μέσης στάθμης της θάλασσας επιβαρύνει τον κίνδυνο εκδήλωσης παράκτιων πλημμυρών, ιδιαίτερα σε περιοχές χαμηλού υψομέτρου και αυξημένης ανθρωπογενούς δραστηριότητας.

Σύμφωνα με τους Kleinen et al. (2007), εκτιμάται ότι περίπου το ένα πέμπτο του παγκόσμιου πληθυσμού κατοικεί σε υδρολογικές λεκάνες οι οποίες ενδέχεται να επηρεαστούν από την αύξηση του πλημμυρικού κινδύνου ως αποτέλεσμα πιθανών μεταβολών του κλίματος.

Επιπλέον, οι Kundzewicz et al. (2005) τονίζουν ότι μία από τις πλέον αξιόπιστες και συγκλίνουσες προβλέψεις των κλιματικών μοντέλων αφορά την αύξηση της έντασης των βροχοπτώσεων σε συνθήκες θερμότερου κλίματος, εξέλιξη που αναμένεται να επηρεάσει καθοριστικά τον κίνδυνο εκδήλωσης αιφνίδιων και αστικών πλημμυρών.

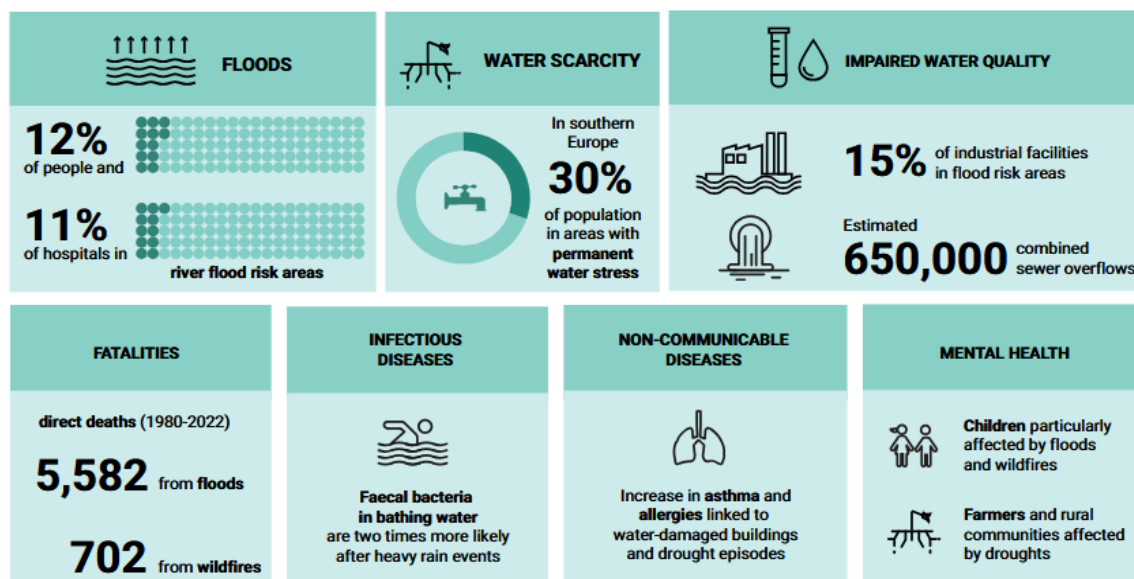
Σύμφωνα με τους Behrens et al. (2010), οι ποτάμιες πλημμύρες προβλέπεται να εμφανίζονται συχνότερα στην κεντρική και ανατολική Ευρώπη, με μέτρια αύξηση στη βόρεια Ευρώπη και μικρότερη ένταση στη νότια. Αντιθέτως, στις χώρες της νότιας Ευρώπης ο κυριότερος κίνδυνος αναμένεται να προέρχεται από την εκδήλωση αιφνίδιων

πλημμυρών. Όπως επισημαίνει και ο Ευρωπαϊκός Οργανισμός Περιβάλλοντος, η κλιματική αλλαγή αναμένεται να οδηγήσει σε σημαντική αύξηση της συχνότητας των φαινομένων αυτών, με άμεση συνέπεια την αύξηση των απωλειών σε ανθρώπινες ζωές.

Συνήθως, οι υδρολογικές λεκάνες στις παράκτιες περιοχές της Μεσογείου χαρακτηρίζονται από περιορισμένη έκταση και αποστραγγίζονται κυρίως μέσω εποχικών χειμάρρων, των οποίων η παροχή νερού είναι ιδιαίτερα χαμηλή κατά τη μεγαλύτερη διάρκεια του έτους. Λόγω αυτών των χαρακτηριστικών, οι λεκάνες αυτές εμφανίζουν αυξημένη ευαισθησία στην εκδήλωση αιφνίδιων πλημμυρών, τα οποία θεωρούνται από τα πλέον καταστροφικά φαινόμενα τόσο για τη Μεσόγειο γενικότερα όσο και για τον ελληνικό χώρο ειδικότερα (Τζήμα 2015). Καθοριστικό ρόλο στην εκδήλωση τέτοιων φαινομένων διαδραματίζει η εμφάνιση έντονων βροχοπτώσεων, ιδίως κατά τους χειμερινούς μήνες, γεγονός που συνιστά τυπικό γνώρισμα του μεσογειακού κλίματος (Παπανικολάου & Διακάκης 2011).

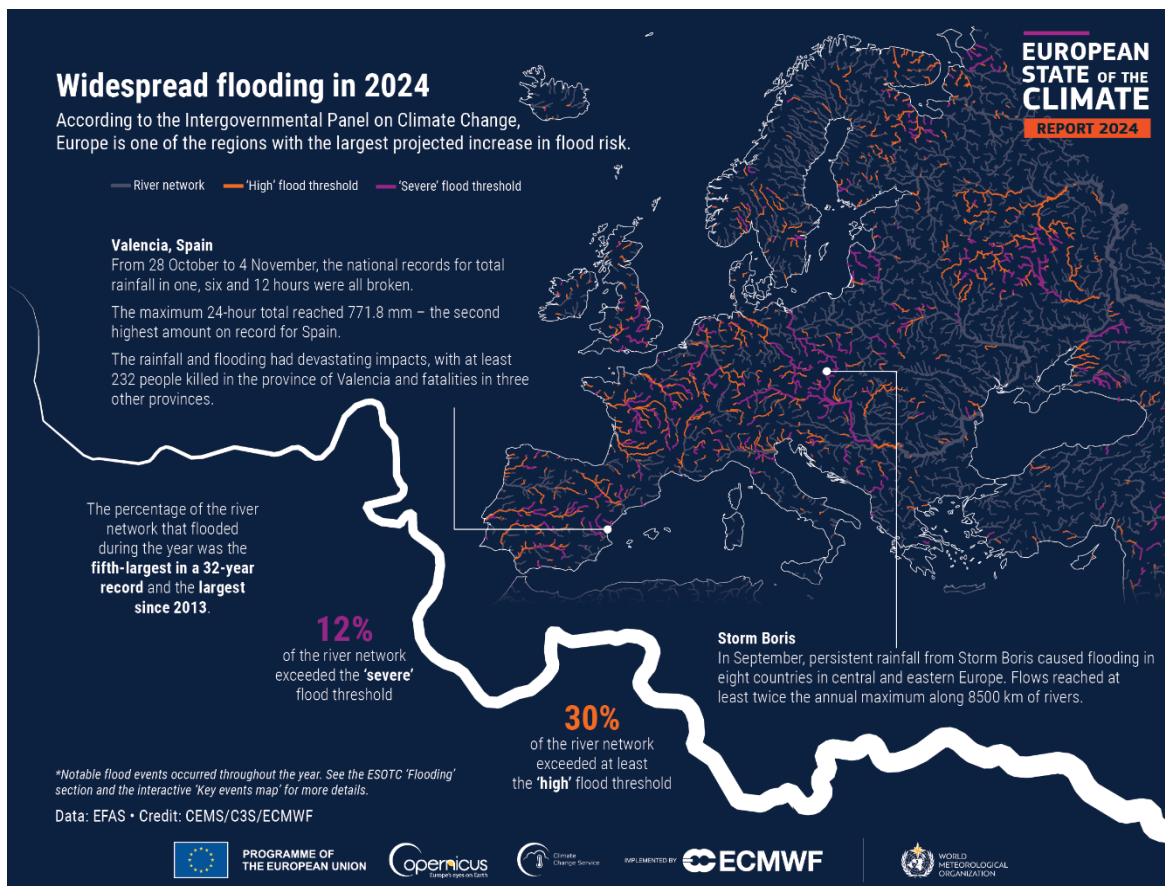
Κατά τις τελευταίες δεκαετίες παρατηρείται στην Ελλάδα αύξηση της εμφάνισης πλημμυρικών φαινομένων σε όρια οικιστικών περιοχών. Τα κύρια αίτια αυτής της τάσης σχετίζονται με τον περιορισμό της κοίτης των ρεμάτων, τον φραγμό των φυσικών κοιτών και τη μείωση των δασικών εκτάσεων, συχνά ως αποτέλεσμα πυρκαγιών. Συνολικά, η συμβολή του ανθρώπινου παράγοντα στην εκδήλωση των πλημμυρών, μαζί με τις αρνητικές επιπτώσεις που προκύπτουν, θεωρείται καθοριστική (Λέκκας, 2000).

Η κλιματική αλλαγή επηρεάζει καθοριστικά τον πλημμυρικό κίνδυνο τόσο σε ευρωπαϊκό όσο και σε παγκόσμιο επίπεδο. Σύμφωνα με τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό Περιβάλλοντος (EEA, 2023), η αύξηση της έντασης των ακραίων βροχοπτώσεων και η άνοδος της στάθμης της θάλασσας αναμένεται να ενισχύσουν τη συχνότητα και την έκταση των πλημμυρών στην Ευρώπη, γεγονός που απαιτεί προσαρμοστικά μέτρα στις υποδομές και τη διαχείριση κινδύνου. Σύμφωνα με έκθεση του οργανισμού (EEA 2024) τα τελευταία χρόνια, οι επιπτώσεις ορισμένων από αυτές τις αλλαγές στην ανθρώπινη υγεία είναι εμφανείς και τραγικά αποδεδειγμένες (π.χ. θάνατοι λόγω πλημμυρών), άλλες (όπως οι ξηρασίες που επηρεάζουν την ψυχική υγεία των αγροτών ή ασθένειες που προκαλούνται από παθογόνα και τοξίνες) δεν έχουν ακόμη ευρέως αναγνωριστεί (Σχήμα 6).



Σχήμα 6 Έκθεση σε κινδύνους από την κλιματική αλλαγή που σχετίζονται με το νερό και ενδεικτικές επιπτώσεις στην υγεία (ΕΑΕΕ, 2024)

Η Διακυβερνητική Επιτροπή για την κλιματική αλλαγή (IPCC, 2022) επισημαίνει ότι η υπερθέρμανση του πλανήτη αυξάνει την πιθανότητα εμφάνισης έντονων βροχοπτώσεων και ακραίων υδρολογικών φαινομένων, επιδεινώνοντας την έκθεση σε πλημμυρικά γεγονότα, ενώ παράλληλα τροποποιεί τη συχνότητα και την κατανομή των βροχοπτώσεων. Τα παρατηρούμενα δεδομένα που παρέχει η υπηρεσία Copernicus Climate Change Service (C3S, 2024) επιβεβαιώνουν την αύξηση των πλημμυρικών γεγονότων στην Ευρώπη, ιδίως σε περιόδους ρεκόρ θερμοκρασιών και έντονων βροχοπτώσεων, και παρέχουν εργαλεία για την παρακολούθηση και διαχείριση του κινδύνου (Σχήμα 7). Συνολικά, οι τρεις οργανισμοί συμφωνούν ότι η κλιματική αλλαγή ενισχύει την έκταση, τη συχνότητα και την ένταση των πλημμυρών, τονίζοντας ταυτόχρονα την αναγκαιότητα προσαρμογής και λήψης μέτρων πρόληψης (EEA 2023; IPCC 2022; Copernicus C3S 2024).



Σχήμα 7 Καταγεγραμμένα πλημμυρικά γεγονότα στην Ευρώπη το 2024
(https://climate.copernicus.eu/european-state-climate-striking-east-west-contrast-and-widespread-flooding-europes-warmest-year?utm_source=chatgpt.com)

2.3 Αστικές πλημμύρες και ανθεκτικότητα των πόλεων

Ο όρος αστικό νερό περιλαμβάνει, πέρα από το πόσιμο, και τις ροές των λυμάτων καθώς και των ομβρίων υδάτων. Η παρούσα διπλωματική εργασία επικεντρώνεται στις απορροές ομβρίων εντός του αστικού ιστού, οι οποίες αντιπροσωπεύουν το ποσοστό του βρόχινου νερού που ρέει επιφανειακά. Το υπόλοιπο μέρος του νερού είτε κατεισδύει στο υπέδαφος είτε επιστρέφει στην ατμόσφαιρα μέσω των διεργασιών εξάτμισης και διαπνοής της βλάστησης. Όταν η ένταση των απορροών υπερβαίνει τη δυναμικότητα απορρόφησης ή παροχέτευσης του αποχετευτικού δικτύου, προκαλείται συσσώρευση υδάτων σε εκτεταμένες περιοχές του αστικού χώρου. Η κατάσταση αυτή ενδέχεται να απειλήσει την ανθρώπινη ασφάλεια και να επιφέρει σημαντικές οικονομικές απώλειες, τόσο εξαιτίας των

ζημιών στις υποδομές όσο και λόγω της διακοπής των οικονομικών δραστηριοτήτων της πόλης (Λεβέντης, 2022).

Σύμφωνα με τον ΕΕΑ, οι πλημμύρες που επηρεάζουν τις αστικές περιοχές διακρίνονται σε ποτάμιες, αιφνίδιες, παράκτιες, πλημμύρες που σχετίζονται με τα αστικά συστήματα αποστράγγισης και πλημμύρες υπόγειων υδάτων. Οι ποτάμιες πλημμύρες προκαλούνται κυρίως από έντονες βροχοπτώσεις, τήξη χιονιού σε ανάντη περιοχές ή παλιρροϊκές επιδράσεις, ενώ οι αιφνίδιες πλημμύρες οφείλονται σε γεγονότα ταχείας απελευθέρωσης υδάτων, όπως ακραίες κατακρημνίσεις ή αστοχίες αντιπλημμυρικών έργων. Οι παράκτιες πλημμύρες συνδέονται με καταιγιδογενείς θαλάσσιες εξάρσεις, ενώ οι πλημμύρες αστικής αποστράγγισης εκδηλώνονται όταν η χωρητικότητα των δικτύων ομβρίων δεν επαρκεί για την απορρόφηση των βροχοπτώσεων. Οι πλημμύρες υπόγειων υδάτων σχετίζονται με την ανύψωση του υδροφόρου ορίζοντα λόγω παρατεταμένων βροχοπτώσεων (ΕΕΑ, 2012).

Σε βόρειες περιοχές, σημαντικά αίτια πλημμυρών αποτελούν η απορροή από τήξη χιονιού, τα φαινόμενα βροχόπτωσης επί χιονοκάλυψης και ο σχηματισμός φραγμάτων πάγου στην κοίτη των ποταμών, τα οποία μπορούν να επιδεινώσουν σημαντικά τις επιπτώσεις, ιδίως όταν συνυπάρχουν περισσότερες του ενός διεργασίες (Shrubsole et al., 2003).

Με τις μεταβαλλόμενες συνθήκες του παγκόσμιου κλίματος και την επίδραση των ανθρώπινων δραστηριοτήτων στο περιβάλλον, τα ακραία επεισόδια βροχόπτωσης στις αστικές περιοχές παρουσιάζουν αύξηση. Τα φαινόμενα έντονων βροχοπτώσεων και οι πλημμυρικές καταστροφές έχουν αναδειχθεί σε μία από τις κύριες φυσικές απειλές που επηρεάζουν την κοινωνική και οικονομική ανάπτυξη των πόλεων, καθώς και την ασφάλεια της ζωής και της περιουσίας των πολιτών (Zhang, 2021; Brody και συν., 2014). Πολλοί ερευνητές έχουν επισημάνει ότι, με την επιτάχυνση της αστικής ανάπτυξης, η συχνότητα εμφάνισης αστικών πλημμυρών αυξάνεται, ενώ οι επιπτώσεις τους ενισχύονται σημαντικά (Hammond και συν., 2015; Dewan και συν., 2012).

Στον Πίνακα 1 συνοψίζονται οι παράγοντες (μετεωρολογικοί, υδρολογικοί, ανθρωπογενείς) που επηρεάζουν τον πλημμυρικό κίνδυνο σε αστικά περιβάλλοντα.

Μετεωρολογικοί παράγοντες	Υδρολογικοί παράγοντες	Ανθρωπογενείς παράγοντες που επιτείνουν τους φυσικούς πλημμυρικούς κινδύνους
Βροχόπτωση	Επίπεδο υγρασίας εδάφους	Μεταβολές στις χρήσεις γης (π.χ. στεγανοποίηση επιφανειών λόγω αστικοποίησης, αποψίλωση δασών), που αυξάνουν την απορροή και ενδέχεται να προκαλέσουν αποθέσεις φερτών υλών
Κатаιγδογενείς θαλάσσιες εξάρσεις (storm surges)	Στάθμη υπόγειων υδάτων πριν από το επεισόδιο καταιγίδας	Ανεπαρκής λειτουργία ή έλλειψη συντήρησης των αποχετευτικών συστημάτων και των έργων διευθέτησης/καθαρισμού των ποτάμιων όχθων
Θερμοκρασία	Παρουσία αδιαπέρατων επιφανειών	Υπερβολικά αποδοτική αποστράγγιση ανάντη περιοχών, η οποία οδηγεί σε αύξηση των πλημμυρικών αιχμών
Χιονόπτωση και τήξη χιονιού	Διατομή, μορφή και ανωμαλίες της κοίτης των υδατορευμάτων	Η κλιματική αλλαγή επηρεάζει το μέγεθος και τη συχνότητα των κατακρημνίσεων και των πλημμυρικών φαινομένων
	Τοπογραφία, κλίση εδάφους και γεωμετρία της λεκάνης απορροής	Το αστικό μικροκλίμα μπορεί να εντείνει τα φαινόμενα κατακρημνίσεων
	Παρουσία ή απουσία υπερχειλίσεων, χαρακτηριστικά του υδρογραφικού δικτύου	Δόμηση σε περιοχές υψηλού πλημμυρικού κινδύνου
	Συγχρονισμός της απορροής από διαφορετικά τμήματα της λεκάνης απορροής	Περιορισμός ή αποκοπή των φυσικών πλημμυρικών πεδίων
	Παρεμπόδιση της αποστράγγισης λόγω υψηλής παλίνρροιας	

Πίνακας 1 Κατάλογος παραγόντων που συμβάλλουν στην εκδήλωση πλημμυρών (Keskitalo, 2013)

Οι αλλαγές στη χρήση και στην κάλυψη γης, η οποία σχετίζεται άμεσα με την έντονη αστικοποίηση των τελευταίων χρόνων, έχει επηρεάσει σε μεγάλο βαθμό τις υδρολογικές διεργασίες, καθώς μειώνουν την κατείσδυση, αυξάνουν την απορροή και οδηγούν σε υψηλότερες και ταχύτερα εμφανιζόμενες αιχμές παροχής (Ferreira et al., 2020).

Σε κλίμακα λεκάνης απορροής, η αστική εξάπλωση μεταβάλλει σημαντικά τις υδρολογικές διεργασίες, εντείνοντας τα πλημμυρικά φαινόμενα. Χαρακτηριστικά αναφέρεται πως σε μια αστικοποιημένη λεκάνη περίπου το 90% των υδάτων καταιγίδας χάνεται ως απορροή, ενώ σε μια αγροτική λεκάνη η απορροή εκτιμάται σε σημαντικά χαμηλότερα επίπεδα, της τάξης του 10-20 % (Du et al., 2019). Ουσιαστικά η αύξηση της

αναλογίας αδιαπέραστων επιφανειών λόγω της υπερβολικής αστικοποίησης μεταβάλλει τα υδρολογικά χαρακτηριστικά των λεκανών απορροής (; Zhang et al., 2015a; Line et al., 2011) αυξάνοντας το μέγεθος της απορροής (Zhang et al., 2018; Ahiablame et al., 2016; Guan et al., 2015). Η ενισχυμένη απορροή επιφέρει πολλαπλές αρνητικές επιπτώσεις, όπως υπερφόρτωση των συστημάτων αποχέτευσης και αυξημένο κίνδυνο αστικών πλημμυρών, μείωση της τροφοδοσίας των υπόγειων και επιφανειακών ροών, καθώς και υποβάθμιση της ποιότητας των υδάτων (Wang et al., 2019; Dong et al., 2017; Baek et al., 2015; Rossman 2010; Dietz, 2007). Υπό αυτές τις συνθήκες καθίσταται ουσιώδης η ύπαρξη μιας αποτελεσματικής μεθόδου διαχείρισης της απορροής ομβρίων υδάτων, ώστε να αντιμετωπιστούν οι προκλήσεις ενός όλο και πιο αστικοποιημένου κόσμου (Larsen et al., 2016).

Η διαδικασία του αντιπλημμυρικού σχεδιασμού στις αστικές περιοχές ξεκινά συνήθως με την εκπόνηση της υδρολογικής μελέτης, μέσω της οποίας προσδιορίζεται η καταιγίδα σχεδιασμού. Ακολουθεί η ανάλυση της υδρολογικής απόκρισης της λεκάνης απορροής και στη συνέχεια ο σχεδιασμός και η υλοποίηση των απαιτούμενων τεχνικών έργων πολιτικού μηχανικού, τα οποία πρέπει να διαθέτουν επαρκή ικανότητα παροχέτευσης για την αντιμετώπιση της παροχής σχεδιασμού. Παρά ταύτα, πάντοτε υφίσταται η πιθανότητα είτε δομικής αστοχίας των έργων είτε λειτουργικής ανεπάρκειας, όταν το ύψος ή η ένταση ενός βροχομετρικού επεισοδίου υπερβαίνει εκείνα της καταιγίδας σχεδιασμού.

Η έννοια της ανθεκτικότητας (resilience) εισήχθη από τον Holling (1973) προκειμένου να ερμηνεύσει την απόκριση των οικοσυστημάτων σε εξωτερικά σοκ, μέσω της απορρόφησης μεταβολών και της διατήρησης των βασικών λειτουργιών τους με διάρκεια στον χρόνο. Η ανθεκτικότητα παρουσιάστηκε ως ιδιότητα του συστήματος σε αντιδιαστολή με την έννοια της σταθερότητας, η οποία προϋπέθετε την επιστροφή του συστήματος σε κατάσταση ισορροπίας μετά από την εκδήλωση ενός σοκ ή μιας πίεσης. Σε ευρύτερο πλαίσιο, η ανθεκτικότητα ορίζεται ως η ικανότητα ενός συστήματος, μιας κοινότητας ή μιας κοινωνίας που εκτίθεται σε σοκ ή πιέσεις να αντιστέκεται, να απορροφά και να ανακάμπτει έγκαιρα και αποτελεσματικά, διατηρώντας και αποκαθιστώντας τις βασικές δομές και τις θεμελιώδεις λειτουργίες της (UNISDR, 2005). Τα τελευταία χρόνια, το ενδιαφέρον της έρευνας για την αξιολόγηση της ανθεκτικότητας

στρέφεται ολοένα και περισσότερο προς τα αστικά περιβάλλοντα, λόγω των προκλήσεων που απορρέουν από την αστικοποίηση και τους συναφείς κινδύνους (U.N., 2019; Borden et al., 2007; Cutter et al., 2003; Quarantelli, 2003). Στο πλαίσιο των σοκ και των πιέσεων, οι πόλεις αντιμετωπίζουν πολλαπλές φυσικές και κοινωνικοοικονομικές προκλήσεις για τη διατήρηση της λειτουργικότητάς τους, γεγονός που καθιστά την ανθεκτικότητα κρίσιμο πεδίο εστίασης της επιστήμης του πολεοδομικού και χωρικού σχεδιασμού. Η περιορισμένη διαθεσιμότητα γης, η υποβάθμιση των οικοσυστημικών υπηρεσιών, η πολυπλοκότητα της αστικής πυκνότητας και η παροχή υπηρεσιών αποτελούν καθοριστικούς παράγοντες για την ενίσχυση της αστικής ανθεκτικότητας μέσω παρεμβάσεων σχεδιασμού.

Με βάση τα παραπάνω η ανθεκτικότητα μιας πόλης στον πλημμυρικό κίνδυνο αναφέρεται στην ικανότητά της να προλαμβάνει ή να μειώνει τις επιπτώσεις από πλημμύρες, να αντιδρά και να ανακάμπτει άμεσα μετά από ένα πλημμυρικό συμβάν και να προσαρμόζεται με βιώσιμο τρόπο για να αντιμετωπίζει μελλοντικές απειλές. Για τον σκοπό αυτό απαιτείται ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο πολεοδομικού και χωρικού σχεδιασμού που να λαμβάνει υπόψη τόσο τους παράγοντες κινδύνου μιας κοινότητας όσο και τα χαρακτηριστικά ανθεκτικότητάς της, προκειμένου να διαμορφώνονται αποτελεσματικά σχέδια αποκατάστασης και μακροπρόθεμες στρατηγικές ενίσχυσης της ανθεκτικότητας απέναντι σε καταστάσεις καταστροφών. Επιπλέον τα χαρακτηριστικά της ανθεκτικότητας μπορεί να παρουσιάζουν χωρικές και χρονικές μεταβολές, οι οποίες συνδέονται με την αστική ανάπτυξη, τις δυναμικές κοινωνικοοικονομικές συνθήκες στις πόλεις και την ένταση φυσικών παραγόντων, όπως είναι η βροχόπτωση σε περιπτώσεις πλημμύρων. Κατά συνέπεια, το πλαίσιο σχεδιασμού αλλά και αξιολόγησης οφείλει να είναι επαρκώς ευέλικτο, ώστε να ενσωματώνει νέους παράγοντες και μεταβαλλόμενα στοιχεία του αστικού συστήματος, τα οποία ενδέχεται να είναι ευάλωτα σε ζημιές και περιορισμούς διαθεσιμότητας πόρων κατά τη διάρκεια φυσικών καταστροφών. Με αυτόν τον τρόπο προσφέρεται η δυνατότητα να υποστηρίζονται οι φορείς λήψης αποφάσεων στην αποτίμηση της χωρικής διαφοροποίησης της ανθεκτικότητας στο πλαίσιο της ταχείας αστικοποίησης ή των αλλαγών χρήσεων γης εντός των πόλεων (Tantrige Osada & Peiris, 2024).

2.4 Συμβατικές προσεγγίσεις διαχείρισης ομβρίων υδάτων («γκρι» υποδομές)

Η συμβατική διαχείριση ομβρίων υδάτων, γνωστή και ως «γκρίζα υποδομή», βασίζεται στη διοχέτευση των απορροών απευθείας σε γειτονικούς υδάτινους αποδέκτες μέσω φρεατίων, υδρορροών και υπόγειων αγωγών (Prudencio & Null, 2018). Σε γενικές γραμμές ο όρος «γκρίζες υποδομές» αναφέρεται στα τεχνικά έργα που έχουν σχεδιαστεί για τη διαχείριση των υδατικών πόρων, όπως είναι οι μονάδες επεξεργασίας ύδατος και λυμάτων, οι αγωγοί και τα φράγματα. Χαρακτηρίζονται από υψηλό βαθμό μηχανολογικού ελέγχου, προκαθορισμένες υδραυλικές παραμέτρους και σχεδιασμό βασισμένο σε συγκεκριμένες περιόδους επαναφοράς βροχοπτώσεων. Η αύξηση της παροχετευτικής ικανότητας των συμβατικών «γκρίζων» υποδομών βασίζεται στην επέκταση και αναβάθμιση των υφιστάμενων συστημάτων.

Οι γκρι υποδομές προσφέρουν υψηλό επίπεδο προβλεψιμότητας και ελέγχου, καθώς βασίζονται σε καθιερωμένα τεχνικά πρότυπα και κανονιστικά πλαίσια. Παρέχουν άμεση και αποτελεσματική προστασία από πλημμύρες σε συνθήκες σχεδιασμού και μπορούν να ενσωματωθούν εύκολα στον υφιστάμενο αστικό ιστό.

Ωστόσο, λόγω των αυξανόμενων πιέσεων που ασκούν η κλιματική αλλαγή και η αστικοποίηση, η ενίσχυση της χωρητικότητας των γκρίζων υποδομών έχει αποδειχθεί ολοένα και πιο δαπανηρή, ιδιαίτερα σε περιοχές με υψηλό βαθμό αστικοποίησης (Hua et al., 2020; Kaeseberg et al., 2018; Quin et al., 2013). Η ταχεία αύξηση των αδιαπέραστων επιφανειών, σε συνδυασμό με τα ακραία βροχομετρικά φαινόμενα που προκαλούνται από την κλιματική αλλαγή, καθιστούν την επέκταση και αναβάθμιση των υφιστάμενων συστημάτων αποχέτευσης ιδιαίτερα δύσκολη. Το υψηλό κόστος κατασκευής και συντήρησης αποτελεί επίσης σημαντικό ανασταλτικό παράγοντα. Επιπλέον οι προσεγγίσεις αυτές δεν συμβαδίζουν με τις επιδιώξεις των σύγχρονων πόλεων για την επίτευξη πολλαπλών στόχων στι πλαίσιο της βιώσιμης αστικής ανάπτυξης (Liu & Jensen, 2018; Gu et al., 2017; Mitchell 2006).

Στο πλαίσιο της σύγχρονης βιώσιμης αστικής ανάπτυξης, οι γκρι υποδομές δεν θεωρούνται πλέον επαρκείς ως αυτόνομες λύσεις. Αντίθετα, αναγνωρίζεται η ανάγκη

συνδυασμού τους με πράσινες υποδομές και NBS, ώστε να επιτευχθεί μια πιο ολοκληρωμένη, ανθεκτική και περιβαλλοντικά φιλική διαχείριση των ομβρίων υδάτων.

2.5 Σύγχρονες προσεγγίσεις διαχείρισης ομβρίων υδάτων

2.5.1 Υδρολογικά ευαίσθητος αστικός σχεδιασμός

Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται η νέα τάση της εφαρμογής πιο ολοκληρωμένων προσεγγίσεων, οι οποίες επιδιώκουν την ταυτόχρονη αντιμετώπιση των μεταβολών του υδρολογικού καθεστώτος από τη μια και της διατήρησης της ποιότητας των υδάτων από την άλλη, ενώ παράλληλα επιχειρείται το νερό της βροχής να αντιμετωπισθεί ως ένας πολύτιμος πόρος και όχι απλώς ως ένα πρόβλημα που πρέπει να εξαιρεθεί. Σε αυτό το πλαίσιο η ανάπτυξη ολοκληρωμένων μοντέλων για την πρόβλεψη και την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας εναλλακτικών προσεγγίσεων στη διαχείριση των ομβρίων υδάτων στις πόλεις, στο πλαίσιο του ευρύτερου αστικού υδρολογικού κύκλου, έχει συγκεντρώσει το επιστημονικό ενδιαφέρον τα τελευταία χρόνια.

Σύμφωνα με τον ΕΟΠ (ΕΟΠ 2021; <https://www.eea.europa.eu/el>), περίπου το ένα τρίτο του πληθυσμού της Ευρώπης υφίσταται πιέσεις ως προς τη διαθεσιμότητα και την ποιότητα των υδάτων. Η πρόκληση αυτή αναμένεται να ενταθεί στο μέλλον, καθώς η κλιματική αλλαγή συμβάλλει στην αύξηση της συχνότητας, της έντασης και της χωρικής έκτασης ακραίων καιρικών φαινομένων, όπως οι παρατεταμένες περιόδους ξηρασίας. Στο πλαίσιο αυτό, η διαχείριση των αστικών υδάτων – συμπεριλαμβανομένων των λυμάτων, των πλημμυρικών φαινομένων, των κατακρημνίσεων και των επιφανειακών απορροών – καθίσταται αναγκαίο να βασίζεται σε ολιστικές και πολυλειτουργικές προσεγγίσεις, οι οποίες αναγνωρίζουν τόσο τις πολλαπλές χρήσεις όσο και τη συνολική αξία του νερού ως πολίτιμου πόρου.

Ο Υδρολογικά Ευαίσθητος Αστικός Σχεδιασμός (Water Sensitive Urban Design – WSUD) αποτελεί μια ολοκληρωμένη προσέγγιση που επιχειρεί να συνδέσει τη διαχείριση του κύκλου του αστικού νερού με το φυσικό και δομημένο περιβάλλον, εντάσσοντάς το στον πολεοδομικό σχεδιασμό. Βασικός στόχος του WSUD είναι η αντιμετώπιση του αστικού νερού ως πολίτιμου και ανανεώσιμου πόρου, η διασφάλιση και η βελτίωση της

ποιότητας των υδάτων, η προστασία των υδατικών οικοσυστημάτων που λειτουργούν ως αποδέκτες, καθώς και η αποτελεσματική διαχείριση των ομβρίων υδάτων και του πλημμυρικού κινδύνου. Επομένως αντί η απορροή των ομβρίων να οδηγείται άμεσα στο δίκτυο αποχέτευσης (μία από τις παραδοσιακές πρακτικές) ο WSUD διαχειρίζεται το νερό ως πόρο επιδιώκοντας να μιμηθεί τον φυσικό κύκλο του νερού στη φύση, να μειώσει την ποσότητα και ταχύτητα της απορροής από αδιαπέραστες επιφάνειες, να βελτιώσει την ποιότητα των υδάτων μέσω φυσικών και τεχνητών διεργασιών, να αυξήσει τη διήθηση, την εξατμοδιάτμιση και την επαναφόρτιση υπόγειων υδατικών οριζόντων, να μειώσει τον κίνδυνο πλημμύρων και να βελτιώσει την ανθεκτικότητα στην κλιματική αλλαγή.

Κύρια χαρακτηριστικά του WSUD είναι (1) η ολιστική διαχείριση του κύκλου του νερού μέσω της ενσωμάτωσης όλων των στοιχείων του κύκλου του νερού σε όλη τη διαδικασία του αστικού σχεδιασμού, (2) η δυνατότητα εφαρμογής τόσο σε μικρές όσο και σε μεγάλης κλίμακας λύσεις από επίπεδο κτηρίου έως επίπεδο πόλης και (3) ο συνδυασμός κατασκευαστικών και φυσικών μέτρων όπως πράσινες στέγες, υδατοπερατά δάπεδα, λεκάνες καθίζησης, δεξαμενές βροχής κ.ά.

Προς αυτή την κατεύθυνση, έχουν υιοθετηθεί διάφορες στρατηγικές διαχείρισης ομβρίων υδάτων, όπως τα Συστήματα Βιώσιμης Αποστράγγισης (Sustainable Drainage System - SUDS), η Ανάπτυξη Χαμηλής Περιβαλλοντικής Επίπτωσης (Low Impact Development - LID), καθώς και οι έννοιες της μπλε και πράσινης υποδομής (Blue and Green Infrastructure - BGI) και της «πόλης-σφουγγάρι» (Sponge City - SC). Οι προσεγγίσεις αυτές στοχεύουν στη μείωση της επιφανειακής απορροής και στην αύξηση της ικανότητας συγκράτησης και διήθησης του νερού (Jia et al., 2017; Fletcher et al., 2015,).

Κατά τις τελευταίες δεκαετίες, έχει αναπτυχθεί ένα ευρύ φάσμα προσεγγίσεων με στόχο τον μετριασμό των υδρολογικών επιπτώσεων καθώς και της επίδρασης της αστικοποίησης στην ποιότητα των υδάτων. Παρ' όλα αυτά, εξακολουθεί να υπάρχει προβληματισμός στην επιστημονική κοινότητα αναφορικά με την εφαρμογή των βέλτιστων πρακτικών, γεγονός που καταδεικνύει ότι η διαχείριση των βροχοπτώσεων και της απορροής των ομβρίων υδάτων στις πόλεις παραμένει ένα πολύπλοκο και απαιτητικό πεδίο.

Παράλληλα, διαμορφώνεται μια νέα κατεύθυνση προς προσεγγίσεις που αποσκοπούν στην αποκατάσταση των καθεστώτων απορροής και ποιότητας των υδάτων, με ολοένα

αυξανόμενο ενδιαφέρον και αναγνώριση του γεγονότος ότι η αποκατάσταση της φυσικής υδατικής ισορροπίας συμβάλλει σε ένα υγιέστερο περιβάλλον και βελτιώνει τις συνθήκες διαβίωσης στις αστικές περιοχές. Παρά την πρόοδο που έχει επιτευχθεί, εξακολουθούν να υπάρχουν πολλά ανοιχτά ζητήματα στον τομέα της αστικής υδρολογίας. Απαιτείται περαιτέρω έρευνα σχετικά με τη χωροχρονική δυναμική των βροχοπτώσεων σε αστικά περιβάλλοντα, ιδίως με στόχο τη βελτίωση των βραχυπρόθεσμων προγνώσεων βροχόπτωσης. Όλα αυτά τα προβλήματα και οι αβεβαιότητες επιδεινώνονται από την ασταθή φύση της κλιματικής αλλαγής, η οποία επιβάλλει την ανάγκη για ευπροσάρμοστα και ανθεκτικά συστήματα διαχείρισης όμβριων υδάτων. Στο πλαίσιο αυτό, η αστική υδρολογία διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στην αντιμετώπιση αυτών των προκλήσεων και στη διαμόρφωση βιώσιμων λύσεων για το μέλλον των πόλεων.

2.5.2 Έννοια και αρχές των Λύσεων Βασισμένων στη Φύση (NBS)

Η έννοια των NBS διατυπώθηκε για πρώτη φορά το 2008 από την Παγκόσμια Τράπεζα (World Bank, 2008), ενώ το πρώτο οργανωμένο ερευνητικό πρόγραμμα με αντικείμενο τις NBS υλοποιήθηκε το 2013 (Sowińska-Świerkosz & García, 2021). Η ανάπτυξη της εν λόγω έννοιας συνδέεται με την αναζήτηση καινοτόμων και βιώσιμων προσεγγίσεων για τη διαχείριση των φυσικών συστημάτων, με στόχο την εξισορρόπηση των οφελιών τόσο για το φυσικό περιβάλλον όσο και για την κοινωνία. Στο πλαίσιο αυτό, η υιοθέτηση πρακτικών που βασίζονται στη συνεργασία με τη φύση, αντί της αντιπαράθεσης προς αυτήν, καθιστά δυνατή την ανάπτυξη και εφαρμογή λύσεων που προάγουν μια ανθεκτική, αποδοτική ως προς τη χρήση των πόρων και περιβαλλοντικά φιλική οικονομία (Science for Environmental Policy, 2021).

Οι NBS αποτελούν ολοκληρωμένες στρατηγικές παρεμβάσεις που αξιοποιούν τις λειτουργίες και τις διεργασίες των οικοσυστημάτων για την αντιμετώπιση σύνθετων περιβαλλοντικών προκλήσεων, προσφέροντας ταυτόχρονα σημαντικά κοινωνικά, οικολογικά και οικονομικά οφέλη (Cohen-Shacham et al., 2016; European Commission, 2015;). Οι παρεμβάσεις αυτές βασίζονται στη χρήση φυσικών μηχανισμών, όπως η διήθηση, η εξατμισοδιαπνοή και η κατακράτηση των υδάτων, μειώνοντας την ανάγκη για

ενεργοβόρες και τεχνοκεντρικές τεχνικές λύσεις (Nesshöver et al., 2017; Kabisch et al., 2016.).

Κεντρική αρχή των NBS αποτελεί η πολυλειτουργικότητα, δηλαδή η επίτευξη πολλαπλών ωφελειών μέσω μίας και μόνο παρέμβασης, όπως η αποτελεσματική διαχείριση των ομβρίων υδάτων, η βελτίωση του αστικού μικροκλίματος, η ενίσχυση της βιοποικιλότητας και η ποιοτική αναβάθμιση των δημόσιων χώρων (Pauleit et al., 2017; Kabisch et al., 2016). Ο σχεδιασμός και η εφαρμογή των NBS προσαρμόζονται στις τοπικές περιβαλλοντικές, κοινωνικές και χωρικές συνθήκες, με στόχο την ενίσχυση της ικανότητας των πόλεων να ανταποκρίνονται και να προσαρμόζονται στις μεταβαλλόμενες κλιματικές συνθήκες, μειώνοντας παράλληλα την τρωτότητά τους σε ακραία καιρικά φαινόμενα (IPCC, 2022; UN-Habitat, 2020). Επιπλέον, η ενεργός συμμετοχή των τοπικών κοινωνιών στον σχεδιασμό και την υλοποίηση των NBS αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για τη μακροχρόνια βιωσιμότητα και κοινωνική αποδοχή των παρεμβάσεων (Nesshöver et al., 2017).

Στο πλαίσιο της αστικής υδρολογίας, οι NBS συμβάλλουν ουσιαστικά στη μείωση του όγκου και της ταχύτητας της επιφανειακής απορροής, στη βελτίωση της ποιότητας των ομβρίων υδάτων και στην αποκατάσταση του φυσικού υδρολογικού κύκλου (Fletcher et al., 2015; EPA, 2014). Ενδεικτικές εφαρμογές περιλαμβάνουν πράσινες στέγες, ζώνες βιοκατακράτησης, αστικούς υγροτόπους και έργα αποκατάστασης ρεμάτων (Kabisch et al., 2016; European Commission, 2021). Τα οφέλη των NBS παρουσιάζονται στο Σχήμα 8.

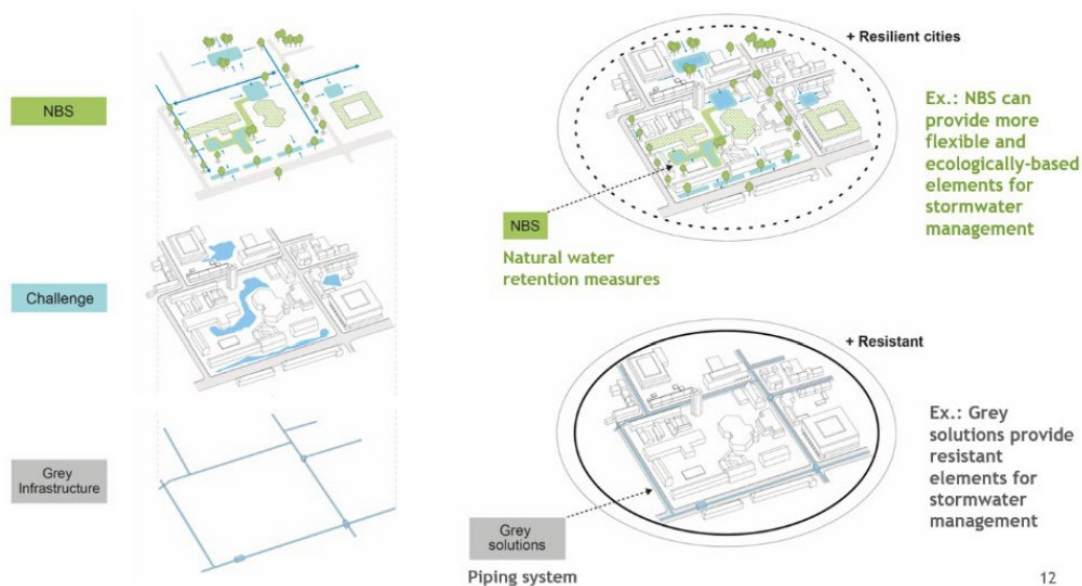


Σχήμα 8 Οφέλη και συν-οφέλη των Λύσεων Βασισμένων στη Φύση (Raymond et al., 2017)

2.5.3 Συνδυαστική προσέγγιση NBS και συμβατικών (γκρίζων) υποδομών στη διαχείριση ομβρίων υδάτων

Παρότι οι προκλήσεις διαφοροποιούνται ανάλογα με το τοπικό και περιφερειακό πλαίσιο, οι NBS προσφέρουν τη δυνατότητα αντιμετώπισής τους, είτε αυτόνομα είτε σε συνδυασμό με άλλες λύσεις (ICLEI, 2017). Το Σχήμα 2.1 παρουσιάζει τον τρόπο με τον οποίο διάφορες NBS είναι αλληλοσυνδεδεμένες και συνδυάζονται με μέτρα γκρίζων υποδομών. Το στοιχείο αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό, καθώς οι NBS δεν αποσκοπούν στην αντικατάσταση των γκρίζων και τεχνικών λύσεων καθεαυτών, αλλά λειτουργούν αποτελεσματικότερα όταν ενσωματώνονται και συνδυάζονται με αυτές.

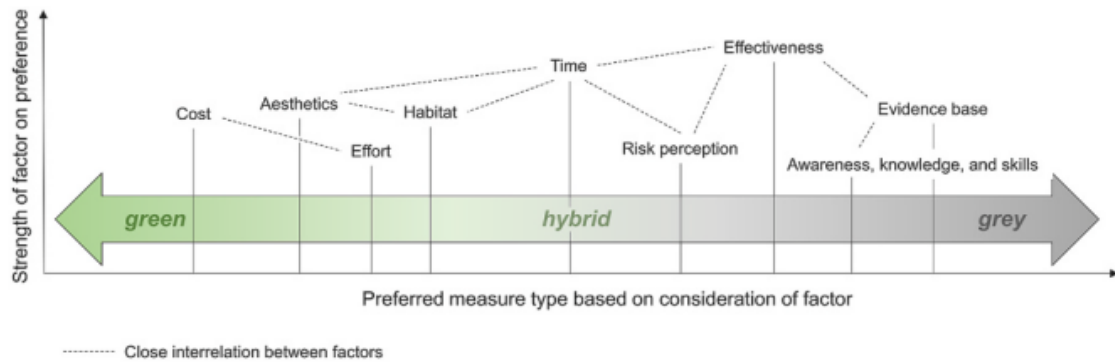
Ως εκ τούτου, οι NBS δεν θα πρέπει να εστιάζουν στην υποκατάσταση των γκρίζων λύσεων, αλλά στην ενσωμάτωσή τους, δεδομένου ότι η φύση μπορεί να διαδραματίσει σημαντικά ισχυρότερο ρόλο στην αντιμετώπιση των εν λόγω προκλήσεων και να καταστήσει τα αστικά και αγροτικά οικοσυστήματα περισσότερο ανθεκτικά στις μεταβολές (Haase, 2016). Η ενίσχυση του πλέγματος ανθεκτικότητας των αστικών οικοσυστημάτων απεικονίζεται στο Σχήμα 9. Στο πλαίσιο αυτό, οι NBS λειτουργούν ως φυσικές μονάδες κατακράτησης υδάτων, ενώ οι γκρίζες υποδομές εξασφαλίζουν τη συμβατική λειτουργία του δικτύου αγωγών.



Σχήμα 9 Συνδυασμός NBS και γκρίζων υποδομών στο πλαίσιο της αποτελεσματικής διαχείρισης ομβρίων υδάτων (<https://www.ilpoe.uni-stuttgart.de/>)

Στη μελέτη των Anderson et al. (2022) επιχειρήθηκε να προσδιοριστούν εκείνες οι παράμετροι που έχουν τη σημαντικότερη επιρροή ως προς την επιλογή NBS, «γκρίζων» υποδομών ή ένας συνδυασμός NBS και «γκρίζων» υποδομών (υβριδικές μέθοδοι) για τη μείωση του υδρομετεωρολογικού κινδύνου. Το Σχήμα 2.2 καταδεικνύει ότι οι δημόσιες προτιμήσεις για μέτρα μείωσης κινδύνου δεν διαμορφώνονται κυρίως από τα περιβαλλοντικά συν-οφέλη των λύσεων βασισμένων στη φύση, αλλά από την αντιλαμβανόμενη αποτελεσματικότητά τους στη μείωση του κινδύνου και από τον βαθμό αβεβαιότητας που τις συνοδεύει. Παρότι η αισθητική, η προστασία της βιοποικιλότητας και το χαμηλότερο κόστος ευνοούν τις πράσινες παρεμβάσεις, η αργή χρονική απόκριση και η αμφιβολία ως προς την ικανότητά τους να αντιμετωπίσουν άμεσα σοβαρούς κινδύνους οδηγούν τους πολίτες σε προτίμηση υβριδικών λύσεων. Τα υβριδικά μέτρα εκλαμβάνονται ως ένας λειτουργικός συμβιβασμός, καθώς συνδυάζουν τη δομική ασφάλεια και την ορατή προστασία των γκρίζων υποδομών με τα μακροπρόθεσμα οικολογικά και κοινωνικά οφέλη των NBS, μειώνοντας παράλληλα τον κίνδυνο μελλοντικής «μετάνοιας» σε περίπτωση αποτυχίας. Συνεπώς, το Σχήμα 10 αναδεικνύει την αβεβαιότητα και τον χρόνο αποτελεσματικότητας ως καθοριστικούς παράγοντες

μετατόπισης των προτιμήσεων από καθαρά πράσινες προς υβριδικές ή, σε συνθήκες υψηλής αντίληψης κινδύνου, γκρίζες λύσεις.



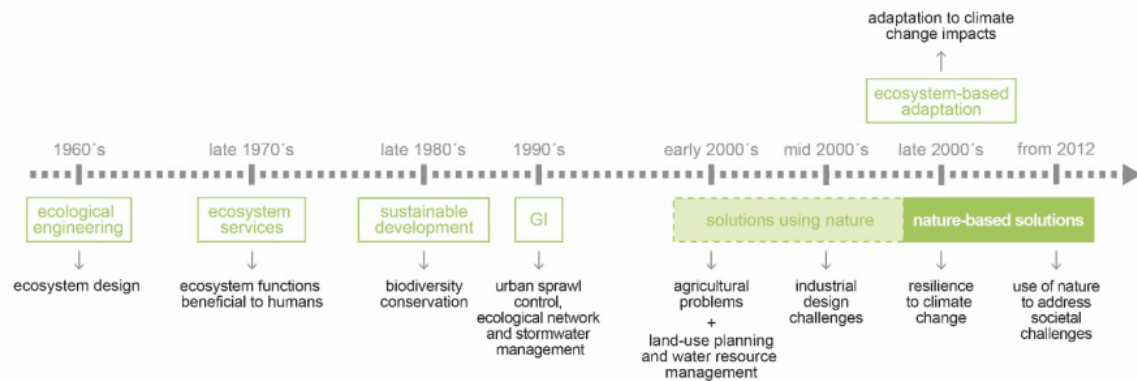
Σχήμα 10 Παράγοντες που διαμορφώνουν τις προτιμήσεις στο φάσμα των πράσινων – υβριδικών – γκρίζων υποδομών για τη μείωση του υδρομετεωρολογικού κινδύνου (Anderson et al., 2022)

3. Λύσεις βασισμένες στη φύση (NBS)

3.1 Σχέσεις και εννοιολογικές διασυνδέσεις των NBS στη Φύση με συναφείς έννοιες

Η ανάγκη υιοθέτησης σύγχρονων προσεγγίσεων για τη διαχείριση των ομβρίων υδάτων στο πλαίσιο του βιώσιμου αστικού σχεδιασμού αλλά και γενικότερα τη διαχείριση των υδρομετεωρολογικών κινδύνων, έχει οδηγήσει στην ευρεία χρήση και διάδοση εννοιών όπως οι Πράσινες Υποδομές (Green Infrastructure – GI), η Προσαρμογή στην Κλιματική Αλλαγή βασισμένη στα Οικοσυστήματα (Ecosystem-based Adaptation – EbA), η οικολογική μηχανική (eco-engineering), καθώς και άλλες συναφείς προσεγγίσεις. Σε αυτό το εννοιολογικό πλαίσιο, οι Λύσεις βασισμένες στη Φύση (Nature Based Solutions – NBS) αποτελούν μια σχετικά νεότερη έννοια. Η εισαγωγή των Λύσεων βασισμένων στη Φύση δικαιολογείται από το γεγονός ότι επιτρέπουν την αξιοποίηση και ενίσχυση των φυσικών διεργασιών, συμβάλλοντας αφενός στην προσαρμογή στις μελλοντικές περιβαλλοντικές μεταβολές και αφετέρου στη μείωση των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής, ενώ παράλληλα προάγουν την ανθρώπινη ευημερία (Cohen-Shacham et al., 2016)

Η διαθέσιμη βιβλιογραφία υποδεικνύει ότι οι NBS θα πρέπει να νοούνται ως μια εννοιολογική ομπρέλα (Nesshöver et al., 2017; Pauleit et al., 2017), η οποία αποσκοπεί στη συμπερίληψη όλων των παρεμβάσεων βιωσιμότητας που αξιοποιούν τη φύση και τις οικοσυστημικές λειτουργίες, όπως οι Πράσινες Υποδομές, η EbA και άλλες συγγενείς προσεγγίσεις (Pauleit et al., 2017).

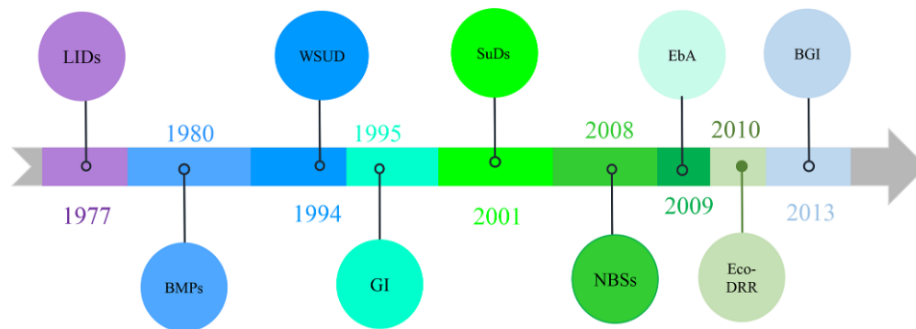


Σχήμα 11 50χρόνια εξέλιξης της έννοιας των NBS (IUCN, 2016; ILPÖ based on Eggermont, 2015;; Potschin et al., 2015; NAP, 1996)

Λόγω της ποικιλομορφίας των πολιτικών πλαισίων από τα οποία προέρχεται, η ορολογία των NBS έχει εξελιχθεί στη βιβλιογραφία ώστε να δίνει έμφαση σε διαφορετικές πτυχές των φυσικών διεργασιών ή λειτουργιών. Στο πλαίσιο αυτό, στη διεθνή επιστημονική βιβλιογραφία απαντώνται συνήθως εννέα διαφορετικοί όροι σε σχέση με τη μείωση του υδρομετεωρολογικού κινδύνου: αναπτύξεις χαμηλής περιβαλλοντικής όχλησης (Low-Impact Developments, LIDs), βέλτιστες πρακτικές διαχείρισης (Best Management Practices, BMPs), αστικός σχεδιασμός ευαίσθητος στο νερό (Water-Sensitive Urban Design, WSUD), βιώσιμα αστικά συστήματα αποστράγγισης (Sustainable Urban Drainage Systems, SuDs), πράσινες υποδομές (Green Infrastructure, GI), γαλάζιο-πράσινες υποδομές (Blue-Green Infrastructure, BGI), προσαρμογή βασισμένη στα οικοσυστήματα (Ecosystem-based Adaptation, EbA) και μείωση του κινδύνου καταστροφών βασισμένη στα οικοσυστήματα (Ecosystem-based Disaster Risk Reduction, Eco-DRR). Η χρονική αποτύπωση των όρων, όπως αυτή προκύπτει από τη βιβλιογραφική τους εμφάνιση, απεικονίζεται στο Σχήμα 12, ενώ οι ορισμοί τους παρουσιάζονται αναλυτικά στον Πίνακα 2.

Ορολογία	Ορισμός, στόχοι και σκοπός	Περιοχές όπου χρησιμοποιείται συνήθως	Αναφορά
LIDs	«Οι LID χρησιμοποιούνται ως ανασχεδιασμένες παρεμβάσεις με στόχο τη μείωση της πίεσης στις αστικές υποδομές όμβριων υδάτων και/ή τη δημιουργία ανθεκτικότητας για προσαρμογή στις κλιματικές αλλαγές. Οι LID βασίζονται κυρίως στη διήθηση και την εξατμοδιαπνοή και επιχειρούν να ενσωματώσουν φυσικά χαρακτηριστικά στον σχεδιασμό.»	ΗΠΑ, Νέα Ζηλανδία	Eckart et al. (2017)
BMPs	«Συσκευή, πρακτική ή μέθοδος για την αφαίρεση, μείωση, καθυστέρηση ή αποτροπή των στοχευμένων συστατικών, ρύπων και μολυσματικών στοιχείων όμβριων υδάτων από το να φτάσουν σε υδατικά σώματα υποδοχής.»	ΗΠΑ, Καναδάς	Strecker et al. (2001)
WSUD	«Διαχείριση της ισορροπίας του νερού, διατήρηση και, όπου είναι δυνατόν, βελτίωση της ποιότητας του νερού, ενθάρρυνση της εξοικονόμησης νερού και διατήρηση περιβαλλοντικών και αναψυχικών ευκαιριών σχετιζόμενων με το νερό.»	Αυστραλία	Whelans consultants et al. (1994)
SuD	«Αναπαράσταση των φυσικών διαδικασιών αποστράγγισης μιας περιοχής – συνήθως μέσω παρεμβάσεων βασισμένων σε βλάστηση όπως τάφροι, υδροκήποι και πράσινες στέγες – που αυξάνουν τη τοπική διήθηση, μειώνουν τη ροή και/ή συγκρατούν τα όμβρια ύδατα.»	Ηνωμένο Βασίλειο	Ossa-Moreno et al. (2017)
GI	«Το δίκτυο φυσικών και ημι-φυσικών περιοχών, χαρακτηριστικών και πράσινων χώρων σε αγροτικές και αστικές, χερσαίες, γλυκό- και θαλάσσιες περιοχές, που ενισχύει την υγεία και την ανθεκτικότητα των οικοσυστημάτων, συμβάλλει στη διατήρηση της βιοποικιλότητας και ωφελεί τον ανθρώπινο πληθυσμό μέσω της συντήρησης και ενίσχυσης των υπηρεσιών οικοσυστήματος.»	ΗΠΑ, Ηνωμένο Βασίλειο	Naumann et al. (2011)
EbA	«Η χρήση της βιοποικιλότητας και των υπηρεσιών οικοσυστήματος ως μέρος μιας συνολικής στρατηγικής προσαρμογής, για να βοηθηθούν οι άνθρωποι να προσαρμοστούν στις δυσμενείς επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής.»	Καναδάς, Ευρώπη	CBD (2009)
Eco-DRR	«Η βιώσιμη διαχείριση, διατήρηση και αποκατάσταση των οικοσυστημάτων για τη μείωση του κινδύνου καταστροφών, με στόχο την επίτευξη βιώσιμης και ανθεκτικής ανάπτυξης.»	Ευρώπη, ΗΠΑ	Estrella & Saalimaa (2013)
BGI	«Οι BGI παρέχουν μια σειρά υπηρεσιών, όπως: παροχή νερού, ρύθμιση κλίματος, έλεγχο ρύπανσης και κινδύνων (υδάτινες υπηρεσίες/αγαθά), καλλιέργειες, τρόφιμα και ξυλεία, βιοποικιλότητα άγριων ειδών, αποτοξίνωση, πολιτιστικές υπηρεσίες (φυσική υγεία, αισθητική, πνευματική), καθώς και δυνατότητες προσαρμογής και μετριασμού της κλιματικής αλλαγής.»	Ηνωμένο Βασίλειο	Lawson et al. (2014)
NBSs	«Οι NBS αποσκοπούν στο να βοηθήσουν τις κοινωνίες να αντιμετωπίσουν διάφορες περιβαλλοντικές, κοινωνικές και οικονομικές προκλήσεις με βιώσιμους τρόπους. Πρόκειται για δράσεις εμπνευσμένες από τη φύση, υποστηριζόμενες από αυτήν ή αντλημένες από αυτήν, αξιοποιώντας και ενισχύοντας υπάρχουσες λύσεις, καθώς και εξερευνώντας νέες και καινοτόμες προσεγγίσεις.»	Ευρώπη	EC (2015)

Πίνακας 2 Λεξιλόγιο όρων και η γεωγραφική τους χρήση (Ruangpan et al., 2020)



Σχήμα 12 Χρονολόγηση και έτος προέλευσης κάθε όρου LIDs, BMPs, WSUD, GI, SuDs, NBSs, EbA, Eco-DRR και BGI) βάσει της πρώτης τους εμφάνισης στις επιστημονικές δημοσιεύσεις (Ruangpan et al., 2020).

Ιδιαίτερα στο πλαίσιο του αστικού σχεδιασμού, η έννοια των NBS χρησιμοποιείται συχνά με τρόπους παρόμοιους με εκείνους της EbA και των Πράσινων Υποδομών, γεγονός που αντανακλά τις σημαντικές εννοιολογικές επικαλύψεις μεταξύ των προσεγγίσεων αυτών (Pauleit et al., 2017; Kabisch et al., 2016;). Ωστόσο, όπως επισημαίνουν οι Pauleit και συν. (2017), ο απλός «εκ νέου χαρακτηρισμός» (*re-labelling*) καθιερωμένων πρακτικών στον αστικό σχεδιασμό υπονομεύει την κατανόηση και την αποτελεσματική αξιοποίηση τόσο των NBS όσο και των προγενέστερων συναφών εννοιών. Συγκεκριμένα, η πρακτική αυτή δεν περιορίζει μόνο τη δυνατότητα άντλησης ουσιαστικών συμπερασμάτων από αναλύσεις και αξιολογήσεις των NBS, αλλά επιπλέον δυσχεραίνει τη συμβολή τους στη διαμόρφωση αποτελεσματικών πλαισίων διακυβέρνησης, στην εφαρμογή των σχετικών παρεμβάσεων, καθώς και στη διεύρυνση και κλιμάκωσή τους.

Αναφορικά με τις ομοιότητες και τις διαφορές μεταξύ των NBS, της EbA και των GI, οι Kabisch et al. (2016) επισημαίνουν ότι οι έννοιες αυτές συνιστούν συστημικές προσεγγίσεις, στο πλαίσιο των οποίων εφαρμόζονται συγκεκριμένες παρεμβάσεις για την αντιμετώπιση ζητημάτων βιωσιμότητας. Αντίστοιχα, σύμφωνα με τους Nesshöver et al. (2017), η σημαντικότερη κοινή συνισταμένη μεταξύ των NBS και των συναφών εννοιών είναι η ρητή συσχέτιση μεταξύ της φύσης και των «θετικών αποτελεσμάτων» για την κοινωνία.

Οι NBS, οι GI και η EbA έχουν επίσης κοινό χαρακτηριστικό ότι εντάσσονται σε διεπιστημονικά και διατομεακά ερευνητικά πλαίσια και βασίζονται σε συμμετοχικές

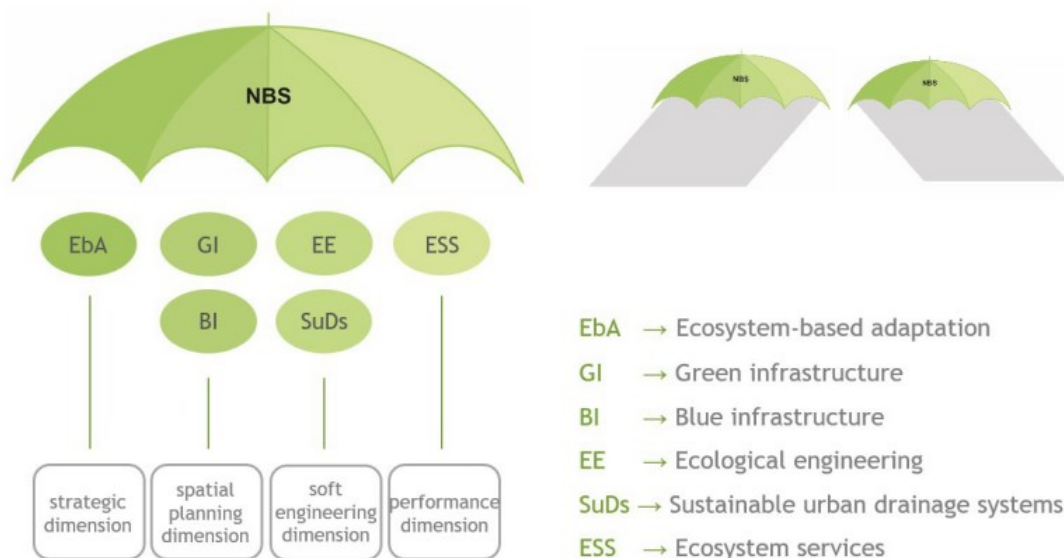
μορφές διακυβέρνησης (Pauleit et al., 2017). Επιπλέον, και οι τρεις προσεγγίσεις προωθούν την αρχή της πολυλειτουργικότητας. Ωστόσο, όπως επισημαίνουν οι Pauleit et al. (2017), το εύρος και η εννοιολογική ασάφεια των ορισμών που αποδίδονται σε καθεμία από τις έννοιες καθιστούν δύσκολη τη σαφή διάκριση μεταξύ τους.

Παρά ταύτα, από τη συγκριτική τους ανάλυση προκύπτουν ορισμένες διαφοροποιήσεις: οι Pauleit et al. (2017) εννοιολογούν την EbA και τις GI ως υποσύνολα των NBS, ενώ επισημαίνουν ότι οι GI δίνουν μικρότερη έμφαση στον ρόλο της βιοποικιλότητας και είναι λιγότερο προσανατολισμένες στη δράση σε σύγκριση με τις NBS. Επιπλέον, οι Πράσινες Υποδομές δύνανται να προσφέρουν κατευθύνσεις ως προς τις πρακτικές ενσωμάτωσης των NBS στον αστικό σχεδιασμό.

Αντιστρόφως, οι Nesshöver et al. (2017) αντιλαμβάνονται τις GI ως εφαρμογή των NBS με ρητή έμφαση στις υποδομές, ενώ η EbA νοείται ως μια πιο συστημική προσέγγιση διαχείρισης του φυσικού περιβάλλοντος, με ιδιαίτερη έμφαση στην κοινωνική ένταξη και τη συμμετοχή. Τέλος, οι Kabisch et al. (2016) θεωρούν τις NbS πιο καινοτόμες σε σχέση με τις συναφείς έννοιες, υπό την έννοια ότι βασίζονται σε αυτές, αλλά στοχεύουν πιο ρητά στην αντιμετώπιση ζητημάτων αστικής βιωσιμότητας.

Οι Dorst et al. (2019) επιχείρησαν να αποτυπώσουν τις βασικές ομοιότητες και διαφοροποιήσεις μεταξύ των NBS, της EbA και των GI, αναδεικνύοντας τόσο τις εννοιολογικές τους επικαλύψεις όσο και τις διαφορετικές εμφάσεις κάθε προσέγγισης. Και οι τρεις έννοιες συγκλίνουν ως προς τον συστημικό τους χαρακτήρα, την αξιοποίηση της φύσης για την αντιμετώπιση σύνθετων προκλήσεων βιωσιμότητας, καθώς και την προώθηση της πολυλειτουργικότητας και συμμετοχικών μορφών διακυβέρνησης. Παράλληλα, καταδεικνύεται ότι οι NBS εμφανίζουν τον ευρύτερο εννοιολογικό ορίζοντα, λειτουργώντας ως πλαίσιο-ομπρέλα που περιλαμβάνει ποικίλες μορφές παρεμβάσεων και αντιλήψεων για τη φύση. Η EbA διαφοροποιείται μέσω της σαφούς εστίασης στην προσαρμογή στην κλιματική αλλαγή και στη διαχείριση των οικοσυστημάτων, ενώ οι Πράσινες Υποδομές διακρίνονται για τον εντονότερο χωρικό και σχεδιαστικό τους χαρακτήρα, καθώς και για την έμφαση στη διασύνδεση πράσινων και γαλάζιων χώρων. Συνολικά, η συγκριτική παρουσίαση υπογραμμίζει την ανάγκη σαφέστερης εννοιολογικής

αποσαφήνισης, προκειμένου να διευκολυνθεί η συνεκτική εφαρμογή των σχετικών προσεγγίσεων στον αστικό σχεδιασμό και τη διαχείριση (Σχήμα 13).



Σχήμα 13 Σχέση NBS με υφιστάμενες συγγενείς προσεγγίσεις (<https://www.ilpoe.uni-stuttgart.de/>)

Συνοψίζοντας, η παρούσα ανάλυση ανέδειξε ότι οι NBS, παρά το γεγονός ότι δεν εισάγουν ριζικά νέες αρχές σε σχέση με προγενέστερες έννοιες όπως οι GI και η EbA, συνιστούν ένα ευρύτερο και περισσότερο ενοποιητικό εννοιολογικό πλαίσιο για τον βιώσιμο αστικό σχεδιασμό και ειδικότερα για τη διαχείριση των ομβρίων υδάτων. Η λειτουργία τους ως εννοιολογικής «ομπρέλας» προσφέρει τη δυνατότητα σύνδεσης διαφορετικών επιστημονικών προσεγγίσεων, πρακτικών σχεδιασμού και πεδίων πολιτικής, υπό την προϋπόθεση της αποφυγής του απλού επαναχαρακτηρισμού υφιστάμενων πρακτικών. Η ανάγκη για σαφέστερη εννοιολογική αποσαφήνιση, σε συνδυασμό με την υιοθέτηση ολιστικών, συμμετοχικών και πολυλειτουργικών προσεγγίσεων διακυβέρνησης και σχεδιασμού, αναδεικνύεται ως κρίσιμος παράγοντας για την αποτελεσματική εφαρμογή και κλιμάκωση των NBS. Υπό αυτό το πρίσμα, οι NBS μπορούν να λειτουργήσουν ως καταλύτης για τη μετάβαση προς πιο ανθεκτικά και βιώσιμα αστικά συστήματα, αξιοποιώντας συστηματικά το δυναμικό της φύσης για την αντιμετώπιση σύνθετων περιβαλλοντικών, κοινωνικών και οικονομικών προκλήσεων.

3.2 Κατηγοριοποίηση και τυπολογία των NBS

Οι Eggermont et al. (2015) εισήγαγαν μία τυπολογία Λύσεων Βασισμένων στη Φύση, η οποία δομείται γύρω από δύο θεμελιώδη ερωτήματα: «Σε ποιον βαθμό περιλαμβάνουν οι Λύσεις βασισμένες στη Φύση μηχανικό σχεδιασμό της βιοποικιλότητας και των οικοσυστημάτων;» και «Σε πόσες υπηρεσίες οικοσυστήματος και σε πόσες ομάδες ενδιαφερομένων μερών απευθύνεται μια συγκεκριμένη NBS;» Υπό το πρίσμα των πιθανών ανταλλαγών μεταξύ υπηρεσιών οικοσυστήματος και θεωρώντας ότι η ταυτόχρονη στόχευση πολλών υπηρεσιών και ομάδων ενδιαφερόμενων μερών περιορίζει τη δυνατότητα βέλτιστης παροχής κάθε υπηρεσίας και ικανοποίησης όλων των επιμέρους αναγκών, προτάθηκαν τρεις τύποι των NBS, όπως φαίνονται και στο Σχήμα 14.

Ο Τύπος 1 περιλαμβάνει μηδενική ή ελάχιστη παρέμβαση στα οικοσυστήματα, με στόχο τη διατήρηση ή τη βελτίωση της παροχής ενός φάσματος υπηρεσιών οικοσυστήματος τόσο εντός όσο και εκτός των προστατευόμενων αυτών οικοσυστημάτων. Παραδείγματα αποτελούν η προστασία των μαγκρόβιων δασών σε παράκτιες περιοχές για τον περιορισμό των κινδύνων που σχετίζονται με ακραία καιρικά φαινόμενα και για την παροχή οφελών και ευκαιριών στους τοπικούς πληθυσμούς, καθώς και η θεσμοθέτηση θαλάσσιων προστατευόμενων περιοχών με σκοπό τη διατήρηση της βιοποικιλότητας εντός αυτών, παράλληλα με τη μεταφορά βιομάζας προς τις αλιευτικές περιοχές (Grogud-Colvert και συν., 2014). Ο συγκεκριμένος τύπος NBS συνδέεται, μεταξύ άλλων, με την έννοια των αποθεμάτων βιόσφαιρας, τα οποία περιλαμβάνουν πυρήνες αυστηρής προστασίας για τη διατήρηση της φύσης, καθώς και ζώνες ανάσχεσης και μετάβασης, όπου οι ανθρώπινες δραστηριότητες και η κατοίκηση πραγματοποιούνται με βιώσιμο τρόπο. Η προσέγγιση αυτή ευθυγραμμίζεται με τον τρόπο με τον οποίο η Διεθνής Ένωση για τη Διατήρηση της Φύσης IUCN (International Union for Conservation of Nature) ορίζει τις NBS.

Ο Τύπος 2 αντιστοιχεί στον σχεδιασμό και την εφαρμογή προσεγγίσεων διαχείρισης που αναπτύσσουν βιώσιμα και πολυλειτουργικά οικοσυστήματα και τοπία (είτε εκτενώς είτε εντατικά διαχειριζόμενα), βελτιώνοντας την παροχή επιλεγμένων υπηρεσιών οικοσυστήματος σε σύγκριση με εκείνη που θα προέκυπτε από μια πιο συμβατική παρέμβαση. Παραδείγματα αποτελούν ο καινοτόμος χωρικός σχεδιασμός αγροτικών

τοπίων με στόχο την ενίσχυση της πολυλειτουργικότητάς τους, καθώς και προσεγγίσεις που αποσκοπούν στην αύξηση της ποικιλότητας των δενδρωδών ειδών και της γενετικής ποικιλότητας, προκειμένου να ενισχυθεί η ανθεκτικότητα των δασών απέναντι σε ακραία φαινόμενα. Ο συγκεκριμένος τύπος NBS συνδέεται στενά με έννοιες όπως η γεωργία φυσικών συστημάτων (natural systems agriculture· Jackson, 2002), η αγροοικολογία (Altieri, 1989) και η εξελικτικά προσανατολισμένη δασοπονία (evolutionary-oriented forestry· Lefèvre και συν., 2014)

Ο Τύπος 3 περιλαμβάνει τη διαχείριση οικοσυστημάτων με ιδιαίτερα παρεμβατικό τρόπο ή ακόμη και τη δημιουργία νέων οικοσυστημάτων, όπως τεχνητά οικοσυστήματα με νέους συνδυασμούς οργανισμών, τα οποία εφαρμόζονται σε πράσινες στέγες και πράσινους τοίχους για τον μετριασμό της υπερθέρμανσης των πόλεων και τον καθαρισμό του ρυπασμένου αέρα. Ο Τύπος 3 συνδέεται με έννοιες όπως οι πράσινες και γαλάζιες υποδομές (green and blue infrastructures· Benedict και McMahon, 2006) και με στόχους όπως η αποκατάσταση έντονα υποβαθμισμένων ή ρυπασμένων περιοχών. Στο πλαίσιο αυτού του τύπου, διερευνώνται επίσης καινοτόμες προσεγγίσεις, όπως ο σχεδιασμός με τη συνδρομή της πανίδας (Hauck & Weisser, 2015), οι οποίες επιχειρούν να γεφυρώσουν το χάσμα μεταξύ διατήρησης της βιοποικιλότητας και αρχιτεκτονικής τοποίου. Η κατηγορία αυτή είναι περισσότερο αντιπροσωπευτική του ορισμού που υιοθετεί η Ευρωπαϊκή Επιτροπή.



Σχήμα 14 Εννοιολογική απεικόνιση των τριών τύπων NBS ως προς τον βαθμό μηχανικής παρέμβασης στα οικοσυστήματα, τον αριθμό των στοχευόμενων υπηρεσιών οικοσυστήματος και ομάδων ενδιαφερόμενων μερών, καθώς και τη δυνατότητα μεγιστοποίησης της παροχής βασικών υπηρεσιών. (Eggermont et al., 2015)

Οι Castellar et al. (2021) επιχείρησαν να ομαδοποιήσουν τους βασικούς τύπους των NBS όπως είχαν ορισθεί σε τέσσερα επιλεγμένα ερευνητικά προγράμματα στο πλαίσιο του H2020: URBANGREENUP (GU), UNALAB (UNL), NATURE4CITIES (N4C) και THINKNATURE (TN). Προτάθηκε ένα τριεπίπεδο ιεραρχικό σχήμα ταξινόμησης όπου το πρώτο επίπεδο του σχήματος ταξινόμησης βασίστηκε στις τρεις υφιστάμενες κατηγορίες που προτάθηκαν από τους Eggermont et al. (2015) όπως περιγράφηκαν παραπάνω. Τα δύο επόμενα επίπεδα της νέας ταξινόμησης προσδιορίστηκαν μέσω συνεντεύξεων με ειδικούς και μέσω ανασκόπησης της βιβλιογραφίας, με σκοπό τον εντοπισμό ομοιοτήτων και διαφορών μεταξύ των υπό εξέταση NBS ως προς τα χαρακτηριστικά τους, τον τύπο της χρησιμοποιούμενης βλάστησης, την κλίμακα εφαρμογής και τον επιδιωκόμενο σκοπό. Ως γενικός κανόνας, σε όλα τα επίπεδα της ταξινόμησης εφαρμόστηκαν τα ακόλουθα κριτήρια: (1) κάθε NBS μπορεί να ενταχθεί αποκλειστικά σε μία μόνο κατηγορία, (2) όλες οι κατηγορίες διαθέτουν περιγραφικές ονομασίες με αυτοτελές νοηματικό περιεχόμενο και (3) όλες οι κατηγορίες πρέπει να μπορούν να μεταφραστούν σε απλά ερωτήματα, τα

οποία λειτουργούν ως καθοδηγητικό εργαλείο για τη χρήση και την περαιτέρω ανάπτυξη της ταξινόμησης.

Στον ακόλουθο Πίνακα 3 παρουσιάζεται ο κατάλογος των 32 κοινών NBS όπως προέκυψαν από τις αντίστοιχες ομαδοποιήσεις / συσχετίσεις NBS, οι οποίες θεωρήθηκαν παρόμοιες ή ισοδύναμες στα προαναφερθέντα ερευνητικά προγράμματα.

Ακολούθησε η ταξινόμηση με μια ιεραρχική δομή τριών επιπέδων όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.2. Το πρώτο επίπεδο διακρίνει μεταξύ μονάδων NBS (**NBSu**: units) που αντιστοιχούν στον Τύπο 3 κατά Eggermont και συν., 2015 και παρεμβάσεων NBS (**NBSi**: interventions) που αντιστοιχούν στον Τύπο 2 κατά Eggermont και συν. (2015).

Οι NBSu αναφέρονται σε πράσινες τεχνολογίες ή πράσινους αστικούς χώρους, είτε αυτόνομους είτε ενταγμένους σε ένα ευρύτερο σύνολο – δηλαδή σε συνδυασμό με άλλες NBS, γκρίζες υποδομές ή συμβατικές τεχνολογίες – σχηματίζοντας έτσι σύνθετα «ζωντανά» συστήματα. Οι NBSu μπορούν να αποτελούν τμήμα της υφιστάμενης αστικής πράσινης/μπλε υποδομής ή να κατασκευάζοντας εξ ολοκλήρου από την αρχή. Επιπλέον, οι εν λόγω μονάδες είναι σε θέση να αναπαράγουν διεργασίες που απαντώνται στη φύση, ενισχύοντας τη λειτουργικότητα του φυσικού κεφαλαίου στις πόλεις και παρέχοντας, κατ' αυτόν τον τρόπο, ένα ευρύ φάσμα οικοσυστημικών υπηρεσιών και συν-οφελών.

Οι NBSi αναφέρονται στην πράξη της παρέμβασης σε συγκεκριμένα οικοσυστήματα ή σε άλλες NBSu, μέσω της εφαρμογής μέτρων ή τεχνικών που υποστηρίζουν τις φυσικές διεργασίες και τη βιοποικιλότητα. Παρότι οι NBSi μπορούν να προσφέρουν ποικίλα συν-οφέλη, εφαρμόζονται συνήθως με στόχο την επίτευξη συγκεκριμένων σκοπών (π.χ. διατήρηση ή ενίσχυση του φυσικού κεφαλαίου, βελτίωση της ποιότητας του εδάφους, πρόληψη ή έλεγχος της διάβρωσης).

32 NBS			Ερευνητικά προγράμματα στα οποία ορίστηκαν ως έννοιες			
			GU	UNL	N4C	TN
NBS 1	Λεκάνη διήθησης	Infiltration basin	X	X		
NBS 2	(Υγρή) δεξαμενή κατακράτησης	(Wet) Retention Pond	X	X		
NBS 3	Κήπος βροχής	Rain garden	X	X		
NBS 4	Τάφος απορροής	Swale	X	X	X	
NBS 5	Κατασκευασμένος υγρότοπος	Constructed wetland	X	X	X	X
NBS 6	Πράσινη όψη (πρόσοψη)	Green façade	X	X	X	X
NBS 7	Σύστημα πράσινου τοίχου	Green wall system	X	X	X	X
NBS 8	Κάθετος κινητός κήπος	Vertical mobile garden	X	X		
NBS 9	Πράσινος τοίχος με ζαρντινιέρες	Planter green wall			X	X
NBS 10	Φυτεμένη πέργκολα	Vegetated pergola	X		X	
NBS 11	Εκτατική πράσινη στέγη	Extensive green roof	X	X	X	X
NBS 12	Εντατική πράσινη στέγη	Intensive green roof	X	X	X	X
NBS 13	Ημιεντατική πράσινη στέγη	Semi-intensive green roof		X	X	X
NBS 14	Δημιουργία και διατήρηση οικοτόπων και καταφυγίων για τη βιοποικιλότητα	Create and preserve habitats and shelters for biodiversity	X		X	X
NBS 15	Δενδροστοιχίες οδών	Street trees	X	X	X	X
NBS 16	Πράσινοι διάδρομοι	Green corridors		X		X
NBS 17	Μεγάλο αστικό πάρκο	Large urban park	X	X	X	X
NBS 18	Κήπος/πάρκο τσέπης	Pocket garden/park	X		X	X
NBS 19	Αστικό δάσος	Urban forest	X	X	X	X
NBS 20	Κήπος πολιτιστικής κληρονομιάς	Heritage garden			X	X
NBS 21	Ιδιωτικοί κήποι	Private gardens			X	X
NBS 22	Κοινοτικός κήπος	Community garden			X	X
NBS 23	Αστικός οπωρώνας	Urban Orchard	X		X	X
NBS 24	Χρήση προϋπάρχουσας βλάστησης	Use of pre-existing vegetation			X	X
NBS 25	Κομποστοποίηση	Composting	X		X	
NBS 26	Βελτίωση εδάφους	Soil improvement	X		X	X
NBS 27	Συστήματα ελέγχου της διάβρωσης	Systems for erosion control			X	X
NBS 28	Τεχνικές μηχανικής όχθων ποταμών	Riverbank engineering		X	X	X
NBS 29	Ποτάμια ή ρέματα, συμπεριλαμβανομένης της επαναδιαμόρφωσης της κοίτης (re-meandering) και επαναλειτουργίας μπλε διαδρόμων	Rivers or streams, including re-meandering, re-opening Blue corridors	X	X	X	X
NBS 30	Επαναδιαμόρφωση / επέκταση πλημμυρικής πεδιάδας	Reprofiling/Extending floodplain area		X	X	
NBS 31	Εκτροπικά και εκτρεπτικά στοιχεία ροής	Diverting and deflecting elements	X	X		X
NBS 32	Διαπερατό φυτεμένο πλέγμα οδοστρώματος	Vegetated grid pave	X	X	X	

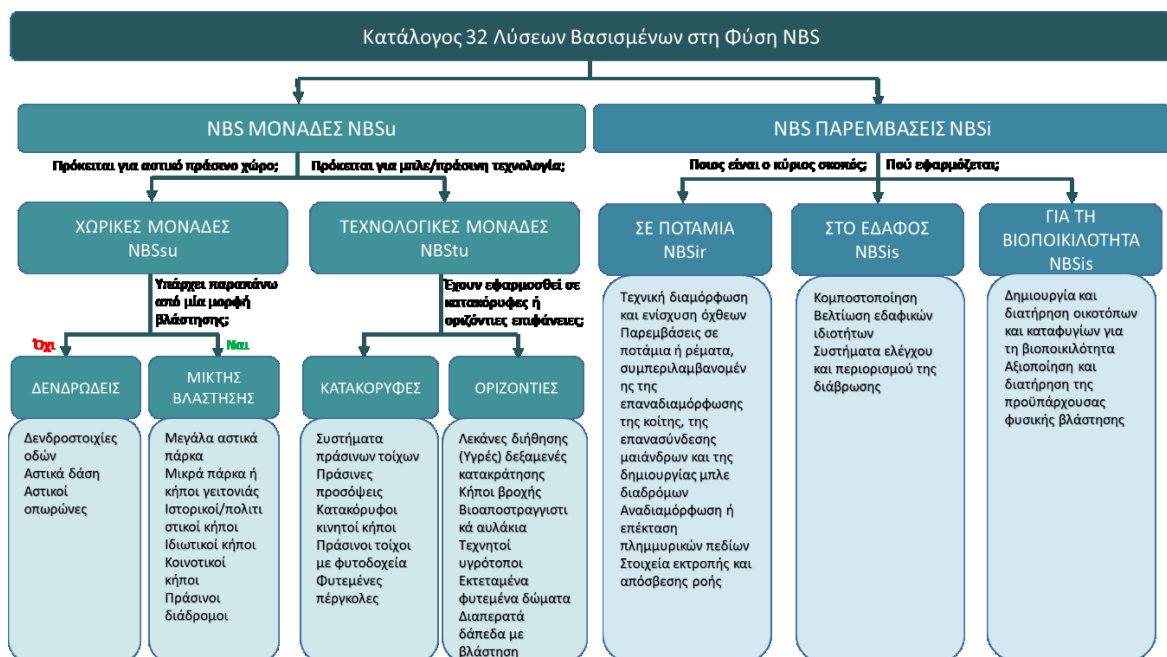
Πίνακας 4 Κοινός κατάλογος NBS και των αντίστοιχων ομαδοποιημένων / συσχετισμένων NBS (οι οποίες θεωρήθηκαν παρόμοιες ή ισοδύναμες μεταξύ των ερευνητικών προγραμμάτων URBANGREENUP GU, UNALAB UNL, NATURE4CITIES N4C και THINKNATURE TN). (Castellar et al., 2021)

Στο δεύτερο επίπεδο της ιεραρχίας, οι NBSu διακρίνονται σε χωρικές και τεχνολογικές μονάδες. Οι χωρικές μονάδες (NBSsu: spatial units) περιλαμβάνουν διαφορετικά στοιχεία της αστικής πράσινης/μπλε υποδομής και σχετίζονται κυρίως με τύπους αστικών πράσινων χώρων (π.χ. πάρκα, κήποι, οπωρώνες, διάδρομοι, δάση) ή μεμονωμένα στοιχεία, όπως τα δένδρα οδών. Οι μονάδες αυτές υλοποιούνται συνήθως στο επίπεδο του **εδάφους και δύναται να προσφέρουν πλήθος συν-οφελών. Οι τεχνολογικές μονάδες (NBStu: technological units)** περιλαμβάνουν πράσινες και μπλε τεχνολογίες που αποσκοπούν στην παροχή συγκεκριμένων λειτουργιών και υπηρεσιών (π.χ. θερμική μόνωση, σκίαση, διήθηση και επεξεργασία νερού) και ως εκ τούτου, παρουσιάζουν ιδιαίτερα χαρακτηριστικά ως προς τον σχεδιασμό, την εφαρμογή και την παρακολούθησή τους. Σε αντίθεση με τις NBSsu, οι NBStu μπορούν να υλοποιηθούν σε ευρύ φάσμα κλιμάκων, από το επίπεδο του εδάφους έως κατακόρυφες επιφάνειες και δώματα κτηρίων. Επιπλέον οι NBStu μπορούν να συνδυαστούν είτε με άλλες NBSu (χωρικές ή τεχνολογικές) είτε με άλλες προηγμένες τεχνολογίες.

Στο τρίτο επίπεδο, οι NBSsu και NBStu ομαδοποιούνται περαιτέρω με βάση, αντίστοιχα, τη μορφή της βλάστησης και την κλίμακα εφαρμογής. Οι NBSsu διακρίνονται σε δύο υποκατηγορίες: Χωρικές Δενδρώδεις Μονάδες (NBSsau), στις οποίες το δενδρώδες στοιχείο αποτελεί την κυρίαρχη μορφή βλάστησης, και Χωρικές Μονάδες Μικτής Βλάστησης (NBS smvu), στις οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν και άλλες μορφές βλάστησης πέραν των δένδρων. Οι NBStu διακρίνονται σε Τεχνολογικές Κατακόρυφες Μονάδες (NBStvu), οι οποίες εφαρμόζονται σε ποικίλες κατακόρυφες επιφάνειες, από όψεις κτηρίων έως αυτόνομες κατακόρυφες κατασκευές στον αστικό χώρο, και σε Τεχνολογικές Οριζόντιες Μονάδες (NBSthu), οι οποίες υλοποιούνται κυρίως σε οριζόντιες επιφάνειες είτε στο έδαφος είτε σε δώματα κτηρίων.

Όσον αφορά τις NBSi, στο δεύτερο επίπεδο αυτές ομαδοποιούνται με βάση τον κύριο σκοπό τους ή τον χώρο στον οποίο λαμβάνει χώρα η παρέμβαση, οδηγώντας στις ακόλουθες υποκατηγορίες: παρεμβάσεις σε ποτάμια (NBSir: river interventions), οι οποίες περιλαμβάνουν ένα ευρύ φάσμα τεχνικών υδρολογικής και ποτάμιας βιομηχανικής για τη διαχείριση της ροής, τον έλεγχο πλημμυρών και τη διάβρωση; παρεμβάσεις στο έδαφος (NBSis: soil interventions), που περιλαμβάνουν τεχνικές εδαφικής βιομηχανικής με στόχο

τη βελτίωση και διατήρηση της ποιότητας του εδάφους ως προς τα φυσικά, χημικά και βιολογικά χαρακτηριστικά του; παρεμβάσεις για τη βιοποικιλότητα (NBSib: biodiversity interventions), οι οποίες περιλαμβάνουν δράσεις και μέτρα για την ενίσχυση και διατήρηση του φυσικού κεφαλαίου στις πόλεις. Η πλειονότητα των NBSi ταξινομήθηκε ως παρεμβάσεις σε ποτάμια και εδάφη, καθώς συχνά αναφέρονται στη βιβλιογραφία ως τεχνικές εδαφικής και υδατικής βιομηχανικής. Για τις NBSi δεν ορίστηκε τρίτο επίπεδο ταξινόμησης.



Σχήμα 15 Νέα ιεραρχική ταξινόμηση των εξεταζόμενων NBS (Castellar et al., 2021)

3.3 Μηχανισμοί λειτουργίας (Απορροή, διήθηση, αποθήκευση, εξάτμιση)

Οι NBS αξιοποιούν φυσικές διεργασίες των οικοσυστημάτων για την αντιμετώπιση περιβαλλοντικών προκλήσεων, όπως είναι η αστική πλημμύρα. Οι βασικοί υδρολογικοί μηχανισμοί μέσω των οποίων λειτουργούν είναι η απορροή (επιφανειακή και υπόγεια) η διήθηση (infiltration), κατακράτηση (storage/retention/detention), εξάτμιση και εξατμισοδιαπνοή (evaporation & evapotranspiration). Στο Σχήμα 16 παρουσιάζεται μία σχηματική απεικόνιση των υδρολογικών μηχανισμών.



Σχήμα 16 Απορροή, διήθηση, αποθήκευση, εξάτμιση. (Εργαστήριο Υδρολογίας και Αξιοποίησης
Υδατικών Πόρων, 2012; http://users.itia.ntua.gr/nikos/hydrology/EduMaterial/2012-13_Lektion3.pdf)

3.3.1 Απορροή

Στο πλαίσιο της τεχνικής υδρολογίας, ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στη μελέτη της επιφανειακής απορροής, καθώς αποτελεί βασική συνιστώσα του υδρολογικού κύκλου και συνδέεται τόσο με τη διαθεσιμότητα των υδατικών πόρων όσο και με την εκδήλωση υδρολογικών κινδύνων, όπως οι πλημμύρες. Παράλληλα η υπόγεια απορροή συνιστά σημαντικό στοιχείο για την κατανόηση και αξιοποίηση των υδατικών πόρων, δεδομένου ότι τροφοδοτεί τους υδροφορείς και συμβάλλει στη διατήρηση της ροής των υδατορευμάτων.

Τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα αποτελούν τον βασικό μηχανισμό τροφοδότησης τόσο της επιφανειακής όσο και της υπόγειας απορροής, διαμορφώνοντας μια σαφή σχέση αιτίου – αποτελέσματος μεταξύ των διεργασιών αυτών. Αντίστοιχα, η εξάτμιση και η διαπνοή της βλάστησης, οι οποίες συνοψίζονται στον όρο εξατμισοδιαπνοή, αντιπροσωπεύουν τις κύριες υδρολογικές απώλειες του συστήματος, δηλαδή το ποσοστό των κατακρημνισμάτων που επιστρέφει στην ατμόσφαιρα και δε συμβάλλει στην απορροή

ή στη διαθέσιμη ποσότητα νερού. Συνεπώς, οι κατακρημνίσεις, η απορροή και η εξατμισοδιαπνοή αποτελούν τις βασικές διεργασίες του υδρολογικού κύκλου, ενώ η ποσοτική τους εκτίμηση παρέχει μια πρώτη συνολική εικόνα του υδατικού ισοζυγίου μιας περιοχής.

Η επιφανειακή απορροή αναφέρεται στη ροή του νερού που κινείται υπό την επίδραση της βαρύτητας κατά μήκος φυσικών υδατορευμάτων, ανεξάρτητα από την κλίμακα αυτών, από μικρούς χειμάρρους έως μεγάλα ποτάμια συστήματα. Η ποσοτική περιγραφή της απορροής πραγματοποιείται συνήθως μέσω της παροχής, του συνολικού όγκου νερού ή του ισοδύναμου ύψους απορροής. Η χρονική μεταβολή της παροχής σε συγκεκριμένη διατομή ενός υδατορεύματος αποτυπώνεται στο υδρογράφημα, το οποίο αποτελεί βασικό εργαλείο ανάλυσης της υδρολογικής απόκρισης μιας λεκάνης απορροής.

Κεντρική έννοια στην υδρολογία αποτελεί η λεκάνη απορροής, δηλαδή η γεωγραφική περιοχή από την οποία τα επιφανειακά ύδατα συγκεντρώνονται και απορρέουν μέσω ενός συγκεκριμένου σημείου ενός υδατορεύματος. Η λεκάνη λειτουργεί ως φυσικό σύστημα μετασχηματισμού, στο οποίο τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα αποτελούν την είσοδο του συστήματος, ενώ η απορροή που εκδηλώνεται στην έξοδο της λεκάνης συνιστά την υδρολογική του απόκριση. Τα μορφολογικά, γεωλογικά, εδαφολογικά και βιοφυσικά χαρακτηριστικά της λεκάνης επηρεάζουν σημαντικά τον τρόπο με τον οποίο το νερό αποθηκεύεται, μετακινείται και τελικά απορρέει.

Από τη σκοπιά της υδραυλικής και της διαχείρισης υδατικών πόρων, η επιφανειακή απορροή έχει ιδιαίτερη σημασία, καθώς αφενός συνιστά κύρια πηγή εκμεταλλεύσιμου νερού και αφετέρου αποτελεί τον βασικό μηχανισμό εκδήλωσης πλημμυρικών φαινομένων. Για τον λόγο αυτό, η κατανόηση των φυσικών μηχανισμών δημιουργίας και διάδοσης της απορροής, καθώς και της χρονικής εξέλιξής της, είναι καθοριστική για την εκτίμηση του πλημμυρικού κινδύνου και τον σχεδιασμό αποτελεσματικών μέτρων διαχείρισης.

Μέρος των κατακρημνισμάτων διηθείται στο έδαφος και κατευθύνεται προς βαθύτερα στρώματα, όπου σχηματίζονται οι υπόγειοι υδροφορείς. Η κίνηση του νερού μέσα στους υδροφορείς, γνωστή ως υπόγεια ροή, πραγματοποιείται λόγω διαφορών στην υδραυλική πίεση και μπορεί να επανεμφανιστεί στην επιφάνεια μέσω πηγών ή μέσω της

τροφοδότησης των υδατορευμάτων. Σε αντίθεση με τις ταχύτερες μορφές απορροής που συνδέονται άμεσα με τα επεισόδια βροχόπτωσης, η υπόγεια ροή χαρακτηρίζεται από πολύ μικρότερες ταχύτητες και μπορεί να τροφοδοτεί τα υδατορεύματα για μεγάλο χρονικό διάστημα μετά το τέλος της βροχόπτωσης.

Η υδρολογική απόκριση μιας λεκάνης απορροής σε επεισόδια έντονων κατακρημνισμάτων εκδηλώνεται συχνά με ταχεία αύξηση της παροχής των υδατορευμάτων. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ένα μέρος του νερού ακολουθεί γρήγορες διαδρομές προς το υδρογραφικό δίκτυο, είτε μέσω επιφανειακής ροής είτε μέσω ρηχών υπεδάφίων διαδρομών. Παράλληλα, σε πολλά υδατορεύματα παρατηρείται συνεχής ροή ακόμη και κατά περιόδους ξηρασίας, γεγονός που υποδηλώνει τη συμβολή της αργής υπόγειας τροφοδότησης.

Με βάση τα παραπάνω, η συνολική απορροή διακρίνεται συνήθως σε δύο κύριες συνιστώσες: την άμεση ή ταχεία απορροή και τη βασική απορροή. Η άμεση απορροή σχετίζεται άμεσα με τα επεισόδια βροχόπτωσης και αποτελεί το αποτέλεσμα του μετασχηματισμού της ενεργού βροχής σε ροή στην έξοδο της λεκάνης. Η διαδικασία αυτή χαρακτηρίζεται από χρονική καθυστέρηση, η οποία αντιστοιχεί στον χρόνο που απαιτείται για τη μεταφορά του νερού μέσω της λεκάνης, ενώ παράλληλα διατηρείται η ισορροπία μάζας μεταξύ της ενεργού βροχόπτωσης και του όγκου της παραγόμενης απορροής.

Αντίθετα, η βασική απορροή προέρχεται κυρίως από την υπόγεια ροή και εμφανίζει μικρότερη μεταβλητότητα κατά τη διάρκεια πλημμυρικών επεισοδίων. Ανάλογα με τη σημασία της βασικής απορροής σε ένα υδρογραφικό σύστημα, τα υδατορεύματα μπορούν να ταξινομηθούν ως μόνιμα, όταν παρουσιάζουν συνεχή ροή καθ' όλη τη διάρκεια του έτους, ως διαλείποντα όταν η ροή εμφανίζεται κυρίως κατά τις υγρές περιόδους, ή ως εφήμερα όταν η ροή παρατηρείται μόνο μετά από έντονες βροχοπτώσεις.

Η κατανόηση των παραπάνω υδρολογικών διεργασιών είναι ιδιαίτερα σημαντική για την εκτίμηση του πλημμυρικού κινδύνου και τον σχεδιασμό μέτρων διαχείρισης λεκανών απορροής, συμπεριλαμβανομένων των Λύσεων Βασισμένων στη Φύση, οι οποίες στοχεύουν στην ενίσχυση των φυσικών μηχανισμών αποθήκευσης, διήθησης και καθυστέρησης της απορροής.

3.3.2 Διήθηση

Η διήθηση (infiltration) αναφέρεται στη μετακίνηση του νερού από την επιφάνεια προς τα εδαφικά στρώματα. Το νερό που εισέρχεται στο έδαφος μπορεί να προέρχεται από ατμοσφαιρικές κατακρημνίσεις, από την τήξη χιονοκάλυψης ή από τεχνητή παροχή μέσω άρδευσης (Rawls et al., 1993). Η διαδικασία αυτή συνδέεται άμεσα με τη ροή του νερού στο πορώδες εδαφικό μέσο, καθώς η ταχύτητα και η έκταση της διείσδυσης εξαρτώνται αφενός από τη διαθεσιμότητα νερού στην επιφάνεια και αφετέρου από τις υδραυλικές ιδιότητες του εδάφους που καθορίζουν την ικανότητά του να επιτρέπει τη μεταφορά του νερού στο εσωτερικό του.

Η διήθηση και η εν συνεχεία κίνηση του νερού εντός του εδάφους διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στη διαμόρφωση της υδρολογικής συμπεριφοράς μιας περιοχής. Επηρεάζουν άμεσα το μέγεθος της επιφανειακής απορροής, τη διαδικασία της εξατμισοδιαπνοής, την επανατροφοδότηση των υπόγειων υδροφορέων, καθώς και τη μεταφορά και κατανομή διαλυμένων ουσιών εντός του εδαφικού συστήματος.

Από ποσοτική άποψη, ο ρυθμός διήθησης δεν είναι σταθερός, αλλά παρουσιάζει σημαντική μεταβλητότητα τόσο χωρικά όσο και χρονικά. Η μεταβολή αυτή καθορίζεται πρωτίστως από τα χαρακτηριστικά της βροχόπτωσης, όπως η ένταση και η διάρκεια, ενώ σημαντική είναι και η συμβολή των φυσικών και υδραυλικών ιδιοτήτων του εδάφους. Επιπλέον, η κατάσταση της επιφανειακής εδαφικής στρώσης, η παρουσία ή απουσία φυτικής κάλυψης, η αρχική εδαφική υγρασία κατά την έναρξη του επεισοδίου βροχής, οι θερμοκρασιακές συνθήκες και η ποιότητα του εισερχομένου νερού συνιστούν παράγοντες που επηρεάζουν ουσιαστικά τη διεργασία. Η πολυπαραγοντική φύση των ανωτέρω επιδράσεων καθιστά την ακριβή εκτίμηση του ρυθμού διήθησης σύνθετη και συχνά απαιτεί εμπειρικές ή ημιεμπειρικές προσεγγίσεις για την ποσοτική του αποτύπωση (Κουτσογιάννης & Ξανθόπουλος, 1999).

Οι θεωρητικές προσεγγίσεις που χρησιμοποιούνται για την περιγραφή της διήθησης θεμελιώνονται στον νόμο ροής σε πορώδη μέσα, όπως αυτός διατυπώθηκε από τον Henry Darcy. Ο νόμος αυτός αποτελεί τη βασική εξίσωση που περιγράφει την κίνηση του νερού εντός κορεσμένων πορώδων σχηματισμών και συνδέει τη ροή με τη διαφορά υδραυλικού φορτίου και τις ιδιότητες του μέσου. Η μαθηματική διατύπωση του νόμου έχει τη μορφή:

$$Q = KA \left(\frac{dh}{dl} \right)$$

όπου Q είναι η παροχή, K η υδραυλική αγωγιμότητα του εδάφους, A η επιφάνεια διατομής ροής και dh/dl η υδραυλική κλίση. Η υδραυλική αγωγιμότητα αποτελεί χαρακτηριστική ιδιότητα του πορώδους μέσου και εξαρτάται από τη δομή, την κοκκομετρία, το πορώδες και τον βαθμό κορεσμού του εδάφους (Τερζίδης & Καραμούζης, 1986; Τζιμόπουλος, 1983;).

Στο πλαίσιο των NBS, η ενίσχυση του μηχανισμού της διήθησης επιτυγχάνεται μέσω συγκεκριμένων παρεμβάσεων που ενσωματώνουν φυσικές διεργασίες στο αστικό και περιαστικό περιβάλλον. Ενδεικτικές εφαρμογές αποτελούν τα συστήματα βιοκατακράτησης (bioretention systems), οι τάφροι διήθησης, οι αστικοί υγρότοποι και οι πράσινες ζώνες απορρόφησης. Οι παρεμβάσεις αυτές σχεδιάζονται με σκοπό την προώθηση της κατακόρυφης μετακίνησης του νερού προς τα εδαφικά στρώματα, αξιοποιώντας τη διαπερατότητα του εδάφους και τη συμβολή της φυτικής κάλυψης στη βελτίωση της εδαφικής δομής.

Η λειτουργική εφαρμογή των ανωτέρω συστημάτων επιφέρει σημαντικά υδρολογικά και περιβαλλοντικά οφέλη. Πρωτίστως, επιτυγχάνεται μείωση της επιφανειακής απορροής, καθώς μέρος του όγκου των ομβρίων υδάτων δεν οδηγείται άμεσα στο αποχετευτικό δίκτυο αλλά απορροφάται από το έδαφος. Παράλληλα, ενισχύεται η φυσική επανατροφοδότηση των υπόγειων υδροφορέων μέσω της σταδιακής διήθησης, συμβάλλοντας στη διατήρηση των υδατικών αποθεμάτων. Επιπλέον, κατά τη διέλευση του νερού από τα εδαφικά στρώματα πραγματοποιείται φυσικός καθαρισμός, ο οποίος βασίζεται σε μηχανισμούς όπως η προσρόφηση ρύπων στα εδαφικά σωματίδια και η βιοαποδόμηση μέσω μικροβιακής δραστηριότητας.

Συνεπώς, οι παρεμβάσεις αυτές δεν περιορίζονται αποκλειστικά στη διαχείριση της απορροής, αλλά λειτουργούν πολυδιάστατα, συνδυάζοντας υδρολογικές, οικολογικές και ποιοτικές λειτουργίες εντός ενός ολοκληρωμένου πλαισίου βιώσιμης διαχείρισης των ομβρίων υδάτων.

3.3.3 Κατακράτηση

Με τον όρο κατακράτηση (retention) περιγράφεται το σύνολο των διεργασιών μέσω των οποίων μέρος της κατακρήμνισης ή της επιφανειακής απορροής παρεμποδίζεται προσωρινά ή καθυστερεί πριν ενταχθεί στο υδρολογικό κύκλωμα. Η έννοια αυτή περιλαμβάνει, αφενός, την παρεμπόδιση (interception) της βροχόπτωσης από τη φυτική κόμη και τα υπέργεια τμήματα της βλάστησης, γεγονός που περιορίζει το ποσοστό του νερού που φθάνει άμεσα στην εδαφική επιφάνεια, και, αφετέρου, την επιφανειακή παγίδευση (depression storage) της απορροής σε μικροκοιλότητες και ανωμαλίες του τοπογραφικού αναγλύφου.

Επιπλέον, ειδική κατηγορία κατακράτησης αποτελεί η συγκράτηση του χιονιού (snow interception), η οποία λαμβάνει χώρα όταν το χιονοκάλυμμα συσσωρεύεται επί της βλάστησης ή της εδαφικής επιφάνειας. Στην περίπτωση αυτή, η αποθήκευση του ύδατος πραγματοποιείται σε στερεή μορφή και η απελευθέρωσή του εξαρτάται από τις θερμοκρασιακές συνθήκες και τις διαδικασίες τήξης (Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 1999).

Η κατακράτηση, ανεξαρτήτως μορφής, διαδραματίζει ουσιώδη ρόλο στη ρύθμιση της απορροής, καθώς επηρεάζει τον όγκο και τον χρόνο απόκρισης των υδρολογικών λεκανών, συμβάλλοντας στη μείωση των αιχμών πλημμυρικής παροχής και στην εξομάλυνση της υδρολογικής συμπεριφοράς ενός συστήματος.

3.3.4 Εξάτμιση και εξατμισοδιαπνοή

Ένα ιδιαίτερα σημαντικό ποσοστό των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων που προσπίπτουν στο χερσαίο τμήμα της επιφάνειας της Γης, το οποίο υπερβαίνει το 60%, επιστρέφει στην ατμόσφαιρα μέσω των διεργασιών της εξάτμισης και της διαπνοής. Το υψηλό αυτό ποσοστό υδρολογικών απωλειών καταδεικνύει τον καθοριστικό ρόλο των εν λόγω φυσικών μηχανισμών στη διαμόρφωση του υδατικού ισοζυγίου και, κατ' επέκταση, στη διαχείριση και αξιοποίηση των υδατικών πόρων σε περιφερειακή κλίμακα.

Ωστόσο το ποσοστό αυτό δεν παραμένει σταθερό, αλλά παρουσιάζει σημαντικές χωρικές και χρονικές διαφοροποιήσεις, επηρεαζόμενο από κλιματικούς, γεωμορφολογικούς και βιοφυσικούς παράγοντες. Κατά συνέπεια, για έναν συγκεκριμένο τόπο και σε δεδομένη

χρονική περίοδο, οι υδρολογικές απώλειες δεν είναι δυνατόν να προσδιοριστούν άμεσα σε υψηλό βαθμό ακρίβειας, παρά τη σημασία τους για τον ορθολογικό σχεδιασμό και την υλοποίηση έργων υδατικής διαχείρισης.

Η αξιόπιστη εκτίμηση των συνολικών απωλειών λόγω εξάτμισης και διαπνοής θα καθιστούσε εφικτό τον έμμεσο αλλά ακριβή προσδιορισμό του διαθέσιμου υδατικού δυναμικού, δηλαδή της συνολικής απορροής, σε ευρείες χρονικές κλίμακες (όπως υπερετήσια, ετήσια ή εποχιακή). Το γεγονός ότι για τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα διατίθενται, κατά κανόνα, επαρκή και αξιόπιστα δεδομένα, ενισχύει περαιτέρω τη σημασία της βελτίωσης των μεθόδων εκτίμησης των απωλειών αυτών στο πλαίσιο της ολοκληρωμένης υδατικής διαχείρισης.

Στο πλαίσιο της υδρολογίας, ο όρος εξάτμιση (evaporation) αναφέρεται, τόσο σε φαινομενολογικό όσο και σε ποσοτικό επίπεδο, στη διεργασία μετατροπής του νερού από την υγρή στην αέρια φάση, με αποτέλεσμα τον σχηματισμό υδρατμών. Ο ρυθμός με τον οποίο εξελίσσεται η φυσική εξάτμιση καθορίζεται από τρεις βασικούς παράγοντες: (α) τη διαθεσιμότητα του νερού σε υγρή μορφή, (β) την παροχή ενέργειας στην επιφάνεια όπου λαμβάνει χώρα η μετατροπή φάσης και (γ) την ικανότητα μεταφοράς και διάχυσης των παραγόμενων υδρατμών προς την ατμόσφαιρα.

Η αντίστοιχη μετατροπή του νερού σε υδρατμούς που συντελείται μέσω των φυτικών ιστών, και ειδικότερα μέσω των φύλλων, ορίζεται ως διαπνοή (transpiration). Το νερό προσλαμβάνεται από το έδαφος μέσω του ριζικού συστήματος και μεταφέρεται, διαμέσου του αγγειακού δικτύου του φυτού, προς τα φύλλα, όπου εξέρχεται στην ατμόσφαιρα μέσω εξειδικευμένων ανοιγμάτων της επιδερμίδας, των στομάτων.

Το άθροισμα των πραγματικών απωλειών νερού που προκύπτουν από την εξάτμιση του εδάφους και από τη διαπνοή της βλάστησης αποδίδεται με τον όρο εξατμισοδιαπνοή (evapotranspiration), ο οποίος χρησιμοποιείται για να περιγράψει συνολικά τη μεταφορά νερού από τη χερσαία επιφάνεια προς την ατμόσφαιρα μέσω των δύο αυτών μηχανισμών.

Σε εδαφικές επιφάνειες, η εξατμισοδιαπνοή λαμβάνει χώρα ανεξαρτήτως του αν αυτές είναι φυτοκαλυμμένες ή γυμνές, εξαρτάται άμεσα από τη διαθεσιμότητα εδαφικής υγρασίας και κατ'επέκταση, από την υδατική κατάσταση των φυτικών ιστών. Η μέγιστη

ποσότητα εξατμισοδιαπνοής που μπορεί να εκδηλωθεί από εδαφικές επιφάνειες πλήρως και ομοιόμορφα καλυμμένες με ενεργά αναπτυσσόμενη βλάστηση, υπό συνθήκες απεριόριστης υδατικής επάρκειας – ορίζεται ως δυνητική εξατμισοδιαπνοή (potential evapotranspiration). Η έννοια αυτή αποτυπώνει το ανώτατο θεωρητικό όριο απωλειών νερού προς την ατμόσφαιρα, όταν η διαθεσιμότητα νερού δεν αποτελεί περιορισμό και η διεργασία ελέγχεται αποκλειστικά από τις επικρατούσες ατμοσφαιρικές συνθήκες. Είναι προφανές ότι η πραγματική εξατμισοδιαπνοή, η οποία αντανακλά τις εκάστοτε υδρολογικές και οικολογικές συνθήκες, δεν μπορεί να υπερβεί τη δυνητική εξατμισοδιαπνοή και, κατά κανόνα, υπολείπεται αυτής, ιδίως σε περιόδους ή περιοχές με περιορισμένη εδαφική υγρασία.

3.4 Υδρολογική και υδραυλική απόδοση των NBS σε αστικό περιβάλλον

Η αστικοποίηση επιφέρει ουσιώδεις μεταβολές στη λειτουργία του υδρολογικού κύκλου, καθώς η αντικατάσταση των φυσικών, διαπερατών επιφανειών από αδιαπέραστα υλικά, όπως η ασφαλτός και το σκυρόδεμα, περιορίζει σημαντικά τη διήθηση και την κατείσδυση του νερού στο έδαφος, ενώ ταυτόχρονα αυξάνει τον συντελεστή επιφανειακής απορροής. Οι μεταβολές αυτές συνεπάγονται αύξηση του όγκου της άμεσης απορροής, μείωση του χρόνου συγκέντρωσης της λεκάνης απορροής, ενίσχυση της αιχμιακής παροχής και περιορισμό της τροφοδοσίας των υπόγειων υδροφορέων. Ως εκ τούτου, ακόμη και βροχοπτώσεις μικρής διάρκειας ή έντασης δύνανται να προκαλέσουν αυξημένη συχνότητα και ένταση αστικών πλημμυρικών επεισοδίων.

Η λειτουργία των NBS δύναται να ερμηνευθεί στο πλαίσιο της εξίσωσης του υδατικού ισοζυγίου:

$$P = ET + Q + \Delta S$$

όπου P αντιστοιχεί στα κατακρημνίσματα, ET στην εξατμισοδιαπνοή, Q στην απορροή και ΔS στη μεταβολή της αποθήκευσης νερού στο σύστημα. Στα αστικά περιβάλλοντα, οι ΛΒΦ αποσκοπούν κυρίως στη μείωση της αιχμιακής παροχής, στην ενίσχυση της αποθήκευσης μέσω διήθησης και κατακράτησης, καθώς και στη σταδιακή αποδέσμευση του αποθηκευμένου όγκου μέσω διεργασιών εξατμισοδιαπνοής. Η προσωρινή

αποθήκευση σε επιφανειακές και υπεδάφειες δομές επιτρέπει την καθυστερημένη εκροή, περιορίζοντας την πιθανότητα υπερχειλίσης των δικτύων ομβρίων και τη μεταφορά πλημμυρικού κύματος προς τις κατάντη περιοχές (Cansian et al., 2025; Hamers et al., 2023).

Ειδικότερα, παρεμβάσεις όπως τα πράσινα δώματα, οι δενδροστοιχίες και τα αστικά πάρκα συμβάλλουν στη διακράτηση μέρους των κατακρημνισμάτων μέσω της βλάστησης και του υποστρώματος ανάπτυξής της. Η προσωρινή αυτή αποθήκευση μειώνει τον άμεσα απορρέοντα όγκο, επιμηκύνει τον χρόνο υδρολογικής απόκρισης της λεκάνης και αποσβένει την αιχμή του υδρογραφήματος. Η καθυστέρηση της απορροής είναι ιδιαίτερα κρίσιμη για τον περιορισμό της υδραυλικής επιβάρυνσης των υφιστάμενων δικτύων ομβρίων, τα οποία συχνά έχουν σχεδιαστεί βάσει παλαιότερων υδρολογικών δεδομένων και ενδέχεται να μην ανταποκρίνονται στις σύγχρονες κλιματικές και αστικές συνθήκες.

Παράλληλα, υποδομές όπως οι βιοτάφροι, τα διαπερατά πεζοδρόμια, οι κήποι βροχής και οι τεχνητοί υγρότοποι ενισχύουν τη διηθητική ικανότητα του εδάφους. Η αύξηση της πορώδους δομής και η βελτίωση της εδαφικής υδραυλικής αγωγιμότητας οδηγούν σε μεγαλύτερη κατείσδυση, αύξηση της υπεδάφιας αποθήκευσης και συνακόλουθη μείωση του άμεσου συντελεστή απορροής.

Επιπλέον, η παρουσία βλάστησης ενισχύει την εξατμισοδιαπνοή, η οποία λειτουργεί ως μηχανισμός απομάκρυνσης νερού από το υδρολογικό σύστημα σε μεσοπρόθεσμη και μακροπρόθεσμη κλίμακα. Παράλληλα, συμβάλλει στη ρύθμιση του ενεργειακού ισοζυγίου και στον μετριασμό του φαινομένου της αστικής θερμικής νησίδας. Αν και η άμεση συνεισφορά της εξατμισοδιαπνοής στη μείωση της έντασης ενός ακραίου πλημμυρικού επεισοδίου είναι περιορισμένη, η συστηματική μείωση της εδαφικής υγρασίας μεταξύ διαδοχικών βροχοπτώσεων αυξάνει τη διαθέσιμη ικανότητα αποθήκευσης, ενισχύοντας τη συνολική ανθεκτικότητα του αστικού υδρολογικού συστήματος.

3.5 Περιβαλλοντικά και κοινωνικά οφέλη

Οι Λύσεις βασισμένες στη Φύση προσφέρουν πληθώρα πρόσθετων ωφελειών πέραν της κύριας λειτουργίας τους που αφορά στο μετριασμό των πλημμυρών. Οι Herath et al. (2025) πραγματοποίησαν στο πλαίσιο βιβλιογραφικής ανασκόπησης για την αποτελεσματικότητα των NBS, μία συστηματική καταγραφή των συμπληρωματικών οφελών που προσφέρουν. Αυτά ταξινομήθηκαν σε περιβαλλοντικές, κοινωνικο-πολιτικές και οικονομικές κατηγορίες.

Τα περιβαλλοντικά οφέλη αποτελούν την πλέον εκτενή και συχνά αναφερόμενη κατηγορία, περιλαμβάνοντας τη διατήρηση της βιοποικιλότητας, υδρολογικά οφέλη, τον καθορισμό της ατμόσφαιρας και τη διατήρηση του εδάφους. Τα οφέλη για τη βιοποικιλότητα εκδηλώνονται κυρίως μέσω της δημιουργίας ενδιαιτημάτων και της υποστήριξης της άγριας ζωής (Guida et al. 2015; Martinez-Martinez et al., 2014), της αποκατάστασης οικολογικών διεργασιών (Krivtsov et al., 2024) και της ενίσχυσης της ποικιλότητας των ειδών (Neumayer et al., 2020; Guida et al., 2015). Τα υδρολογικά οφέλη εκτείνονται πέραν της αντιπλημμυρικής προστασίας, περιλαμβάνοντας τον καθαρισμό των υδάτων, την παγίδευση φερτών υλικών και τον εμπλουτισμό των υπόγειων υδροφορέων (Potočki et al., 2021; Osawa et al., 2020; Kayendeke et al., 2018). Ιδιαίτερη σημασία παρουσιάζουν τα οφέλη διατήρησης του εδάφους, ιδίως σε παρεμβάσεις κλίμακας λεκάνης απορροής, όπου συχνά αναφέρονται η βελτίωση της εδαφικής υγρασίας, η ενίσχυση της διήθησης και ο έλεγχος της διάβρωσης (Revell et al., 2022). Παράλληλα, ο μετριασμός και η προσαρμογή στην κλιματική αλλαγή αναδεικνύονται ως διατομεακά οφέλη, μέσω της δέσμευσης άνθρακα, της ρύθμισης του τοπικού μικροκλίματος και της ενίσχυσης της ανθεκτικότητας σε ακραία φαινόμενα (Penny et al., 2023; Dittrich et al., 2019; Fossey et al., 2016).

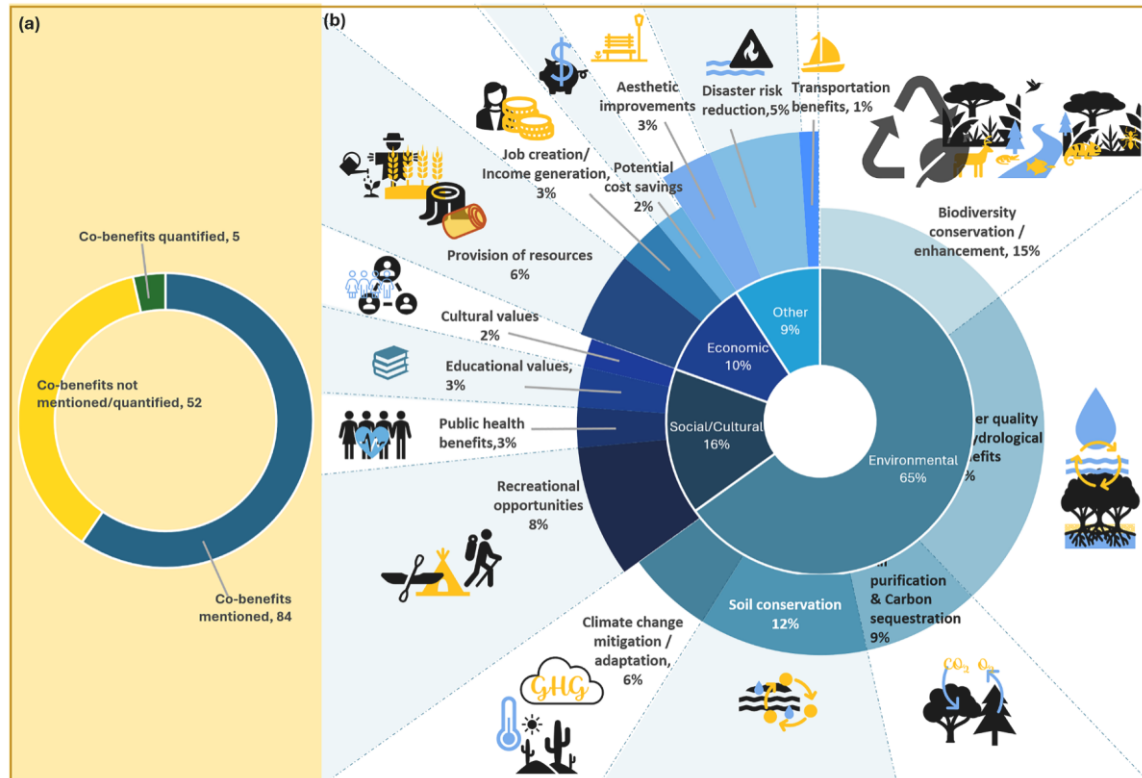
Τα κοινωνικά και πολιτισμικά οφέλη αναδεικνύουν την ευρύτερη κοινωνική αξία των NBS. Οι ευκαιρίες αναψυχής αποτελούν το κυρίαρχο κοινωνικό όφελος περιλαμβάνοντας τη βελτίωση των δημόσιων χώρων, την ανάπτυξη του τουρισμού και την αναβάθμιση των παρεχόμενων υποδομών (Revell et al., 2022; Vojinovic et al., 2021). Τα οφέλη για τη δημόσια υγεία εκτείνονται πέραν της μείωσης του πλημμυρικού κινδύνου, συμβάλλοντας

στη βελτίωση της ποιότητας ζωής και της ευημερίας μέσω της αυξημένης πρόσβασης σε φυσικούς χώρους (Nesshöver et al., 2017). Αρκετές μελέτες αναδεικνύουν επιπλέον τον εκπαιδευτικό ρόλο των NBS, προσφέροντας ευκαιρίες περιβαλλοντικής εκπαίδευσης και ενίσχυσης της κατανόησης οικολογικών διεργασιών (Bezak et al., 2021; Ditttrich et al., 2019). Τα πολιτισμικά οφέλη, αν και λιγότερο συχνά ποσοτικοποιημένα, περιλαμβάνουν την ενίσχυση της κοινωνικής συνοχής και τη διατήρηση πολιτισμικών υπηρεσιών, ιδίως σε περιοχές όπου οι παραδοσιακές πρακτικές διαχείρισης πλημμυρών έχουν πολιτισμική σημασία.

Τα οικονομικά οφέλη αναδεικνύουν τη δυνατότητα των NBS να δημιουργούν απτή οικονομική αξία παράλληλα με την αντιπλημμυρική προστασία. Η παροχή πόρων αποτελεί το κυριότερο οικονομικό όφελος και περιλαμβάνει την παραγωγή ξυλείας, τη βελτίωση της γεωργικής παραγωγικότητας και την ενίσχυση των δυνατοτήτων άρδευσης (Bathurst et al., 2022; Iacob et al., 2017; Martinez-Martinez et al., 2014,). Η δημιουργία θέσεων εργασίας και εισοδήματος προκύπτει τόσο κατά τη φάση υλοποίησης όσο και κατά τη συντήρηση των παρεμβάσεων, ενισχύοντας ιδιαίτερα τις τοπικές κοινωνίες (Liu et al., 2021; Warachowska et al., 2021). Ορισμένες μελέτες επισημαίνουν επίσης τη δυνατότητα ανάπτυξης καινοτόμων χρηματοδοτικών μηχανισμών και βελτιωμένης οικονομικής αποδοτικότητας μέσω της μειωμένης εξάρτησης από γκρίζες υποδομές, αν και τα οφέλη αυτά συχνά εκδηλώνονται σε μακροπρόθεσμο ορίζοντα (Ditttrich et al., 2019).

Η ευρεία γκάμα των καταγεγραμμένων συμπληρωματικών οφελών αναδεικνύει τον ολιστικό χαρακτήρα των NBS στη διαχείριση πλημμυρών. Ωστόσο, η περιορισμένη ποσοτικοποίηση των οφελών αυτών υπογραμμίζει την ανάγκη ανάπτυξης πιο αξιόπιστων και τυποποιημένων πλαισίων αξιολόγησης, προκειμένου να αποτυπωθεί πληρέστερα η συνολική αξία των NBS. Η μελλοντική έρευνα θα πρέπει να επικεντρωθεί στην ανάπτυξη δεικτών και μεθοδολογιών ποσοτικοποίησης των πολλαπλών αυτών οφελών, διευκολύνοντας ολοκληρωμένες αναλύσεις κόστους – οφέλους και υποστηρίζοντας τη λήψη τεκμηριωμένων αποφάσεων στη διαχείριση πλημμυρικού κινδύνου. Παράλληλα, είναι κρίσιμο οι διαδικασίες σχεδιασμού να λαμβάνουν υπόψη πιθανές δυσμενείς επιπτώσεις και φαινόμενα κακής προσαρμογής, όπως ζητήματα ασφάλειας,

εγκληματικότητα και υγείας σε περιπτώσεις ανεπαρκώς διαχειριζόμενων πράσινων χώρων (Herath & Bai, 2024; Lyytimäki et al., 2008; Koskela & Pain, 2000).



Σχήμα 17 Συμπληρωματικά οφέλη που εντοπίστηκαν σε μελέτες περίπτωσης, πέραν του πρωταρχικού οφέλους της μείωσης του κινδύνου πλημμυρών από την εφαρμογή NbS. (α) Αριθμός άρθρων που ανέφεραν, ποσοτικοποίησαν ή δεν ανέφεραν τα συμπληρωματικά οφέλη· (β) Γραφική απεικόνιση των επιμέρους συμπληρωματικών οφελών που καταγράφηκαν (Herath et al., 2025)

3.6 Περιορισμοί και προκλήσεις εφαρμογής σε αστικά περιβάλλοντα

Ενώ οι NBS επιδεικνύουν σημαντικό δυναμικό για το μετριασμό των πλημμυρικών φαινομένων, ορισμένοι περιορισμοί και κρίσιμες παράμετροι ως προς την αποτελεσματικότητά τους απαιτούν ιδιαίτερη προσοχή κατά την εφαρμογή τους σε κλίμακα λεκάνης απορροής. Οι περιορισμοί αυτοί εκτείνονται σε τεχνικές, περιβαλλοντικές, κοινωνικές και οικονομικές διαστάσεις, οι οποίες δύνανται να επηρεάσουν τόσο τη σκοπιμότητα όσο και την αποδοτικότητα των παρεμβάσεων NBS (Πίνακας 5).

Η αποτελεσματικότητα των NBS παρουσιάζει έντονη εξάρτηση από χωρικούς και χρονικούς παράγοντες. Σχεδόν το σύνολο των παρεμβάσεων εμφανίζει φθίνουσα απόδοση κατά τη διάρκεια ακραίων φαινομένων. Στην πλειονότητα των εξεταζόμενων περιπτώσεων, η αποτελεσματικότητα μειώνεται όσο αυξάνεται το μέγεθος της πλημμύρας (Kingsburry-Smith et al., 2023; Badjana et al., 2023; Thomas et al., 2016). Η σχέση μεταξύ της κλίμακας εφαρμογής και της αποτελεσματικότητας είναι συχνά μη γραμμική, καθώς τα οφέλη που παρατηρούνται σε μικρές πειραματικές λεκάνες απορροής δεν μεταφέρονται κατ' αναλογία σε μεγαλύτερες υδρολογικές λεκάνες (Kingsburry-Smith et al., 2023). Η μεταβλητότητα αυτή εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από παράγοντες όπως το μέγεθος της λεκάνης απορροής, η χωρική διάταξη των παρεμβάσεων και η ένταση των καταιγίδων (Kingsburry-Smith et al., 2023; Badjana et al., 2023; Thomas et al., 2016). Παρά το γεγονός ότι οι περισσότερες NBS παρουσιάζουν μειωμένη αποτελεσματικότητα υπό ακραίες συνθήκες, στρατηγικές που ενισχύουν τη διαπερατότητα της επιφάνειας, σε συνδυασμό με κατάλληλα σχεδιασμένες χρήσεις και καλύψεις γης (LULC), δύνανται να προσφέρουν συγκριτικά αυξημένη προστασία έναντι ακραίων πλημμυρών. Επιπλέον, οι χρονικές υστερήσεις μεταξύ της εφαρμογής και της πλήρους απόδοσης των παρεμβάσεων μπορεί να είναι σημαντικές, ιδίως για παρεμβάσεις που βασίζονται στη βλάστηση και απαιτούν χρόνο ωρίμανσης (Dittrich et al., 2019).

Οι περιβαλλοντικοί περιορισμοί αποτελούν επίσης σημαντικό παράγοντα που περιορίζει την εφαρμογή των NBS. Τα χαρακτηριστικά του εδάφους και οι συνθήκες υπόγειων υδάτων μπορούν να περιορίσουν την αποτελεσματικότητα μέτρων που βασίζονται στη διήθηση, ιδιαίτερα σε περιοχές με αργιλικά εδάφη ή υψηλό υδροφόρο ορίζοντα (Sajinkumar et al., 2022; Assessment, 2005). Επιπλέον, τα τοπικά κλιματικά πρότυπα επηρεάζουν καθοριστικά την απόδοση παρεμβάσεων που βασίζονται στη βλάστηση (Ahmad et al., 2020; Martinez-Martinez et al., 2014; <https://www.epa.gov/wetlands/how-do-wetlands-function-and-why-are-they-valuable>). Η κλιματική αλλαγή εισάγει ένα επιπλέον επίπεδο πολυπλοκότητας, καθώς δύναται να μεταβάλει τη μακροχρόνια αποτελεσματικότητα των παρεμβάσεων μέσω αλλαγών στα πρότυπα βροχόπτωσης και της αύξησης της συχνότητας εμφάνισης ακραίων φαινομένων (O'Donnell et al., 2017). Παράλληλα, το ανθρακικό αποτύπωμα της υλοποίησης, ιδίως σε υβριδικές προσεγγίσεις

που περιλαμβάνουν και «γκρίζες» υποδομές, απαιτεί προσεκτική αξιολόγηση (Atkins, 2018; Deemer et al., 2016).

Η εφαρμογή των NBS αντιμετωπίζει σημαντικά κοινωνικοοικονομικά εμπόδια. Η διαθεσιμότητα γης και οι ανταγωνιστικές χρήσεις συχνά δημιουργούν συγκρούσεις, ιδιαίτερα σε περιοχές με έντονη γεωργική ή αστική ανάπτυξη (Dunn et al., 2022; Lama et al., 2021). Οι οικονομικές επιπτώσεις μπορεί να είναι σημαντικές· αν και οι NBS δύνανται να προσφέρουν μακροπρόθεσμα οικονομικά οφέλη, συχνά απαιτούν υψηλό αρχικό κόστος επένδυσης καθώς και συνεχή συντήρηση (Klijn et al., 2013). Ενδεικτικά, οι διαπερατές επιφάνειες απαιτούν τακτική συντήρηση, καθώς η απόφραξη των πόρων μειώνει την ικανότητα διήθησης. Η κοινωνική αποδοχή παρουσιάζει διαφοροποιήσεις, με πιθανές αντιστάσεις που απορρέουν από αισθητικές προτιμήσεις ή την προτίμηση σε συμβατικές υποδομές. Επιπροσθέτως, κοινωνικοοικονομικοί και πολιτικοί περιορισμοί πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά τον σχεδιασμό εκτεταμένων αλλαγών χρήσεων γης, οι οποίες απαιτούν σημαντικούς οικονομικούς πόρους, πολιτική βούληση και κοινωνική συναίνεση.

Τέλος, προκλήσεις που σχετίζονται με τη διακυβέρνηση και τους θεσμούς συνιστούν πρόσθετα εμπόδια. Η πολυπλοκότητα των εμπλεκόμενων φορέων απαιτεί προσεκτικό συντονισμό μεταξύ πολλαπλών διοικητικών επιπέδων και ομάδων συμφερόντων (Ward et al., 2013). Το υφιστάμενο κανονιστικό πλαίσιο και οι μηχανισμοί χρηματοδότησης ενδέχεται να μην υποστηρίζουν επαρκώς τις προσεγγίσεις NBS, ενώ απουσιάζουν συχνά τυποποιημένα πλαίσια για την αξιολόγηση και επαλήθευση της αποτελεσματικότητάς τους (O'Donnell et al., 2017). Η ανάγκη για μακροχρόνια παρακολούθηση και συντήρηση ενδέχεται να επιβαρύνει τις θεσμικές δυνατότητες και τους διαθέσιμους πόρους (Hankin et al., 2020), καθιστώντας αναγκαία την υιοθέτηση προσαρμοστικών στρατηγικών διαχείρισης, ικανών να ανταποκρίνονται στις μεταβαλλόμενες περιβαλλοντικές συνθήκες και στην εξέλιξη της απόδοσης των παρεμβάσεων.

Κατηγορία	Περιορισμός / Παράγοντας εξέτασης	Ενδεικτικές αναφορές
Τεχνικοί	Μειούμενη αποτελεσματικότητα κατά τη διάρκεια ακραίων φαινομένων. Εξάρτηση από την κλίμακα και μη γραμμικά οφέλη. Χρονική υστέρηση μεταξύ υλοποίησης και απόδοσης αποτελεσμάτων.	Badjana και συν., 2023 Thomas και Nisbet, 2016 Kingsbury-Smith και συν., 2023 Dittrich και συν., 2019
Περιβαλλοντικοί	Περιορισμοί που σχετίζονται με το έδαφος και τα υπόγεια ύδατα. Επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στη μακροπρόθεσμη αποτελεσματικότητα. Ανθρακικό αποτύπωμα της υλοποίησης.	Iacob και συν., 2017 Liu και Wang, 2021 Wang και συν., 2019 Atkins, 2018 Deemer και συν., 2016
Κοινωνικο-οικονομικοί	Διαθεσιμότητα γης και ανταγωνιστικές χρήσεις. Οικονομικές επιπτώσεις και απαιτήσεις χρηματοδότησης (ανάλογα με την ανάλυση κόστους-οφέλους). Κοινωνική αποδοχή και αντιστάσεις.	Dunn και συν., 2022 Lama και συν. 2021 Klijn και συν., 2013
Διακυβέρνηση	Πολυπλοκότητα στον συντονισμό των εμπλεκόμενων φορέων. Κανονιστικά και θεσμικά εμπόδια. Απαιτήσεις συντήρησης και παρακολούθησης.	Ward και συν., 2013 O'Donnell και συν., 2017 Hankin και συν., 2020

Πίνακας 6 Συνήθεις περιορισμοί και παράγοντες που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη και επηρεάζουν την αποτελεσματικότητα των NBS για τη μείωση του κινδύνου πλημμυρών (Herath et al., 2025)

4. Μεθοδολογικό πλαίσιο διαχείρισης ομβρίων υδάτων χρησιμοποιώντας NBS

4.1 Ερευνητική προσέγγιση και σχεδιασμός της μελέτης

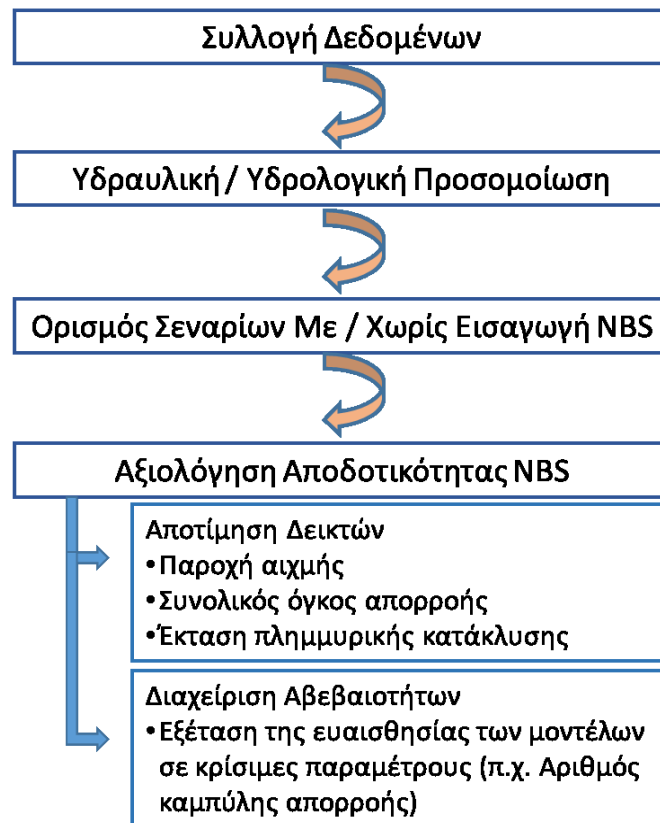
Η σύγχρονη επιστημονική έρευνα εστιάζει ολοένα και περισσότερο στην ανάπτυξη μεθοδολογιών για την αξιολόγηση της αποδοτικότητας των NBS στη διαχείριση ομβρίων υδάτων, μέσω της ποσοτικοποίησης της απόδοσής τους. Η αξιολόγηση αυτή δύναται να πραγματοποιηθεί μέσω προσομοιώσεων και αριθμητικών αναλύσεων, αξιοποιώντας κατάλληλα υδρολογικά και υδραυλικά μοντέλα, καθώς και εξειδικευμένα λογισμικά εργαλεία.

Ένα ευρύ φάσμα τέτοιων μοντέλων έχει χρησιμοποιηθεί για την προσομοίωση παρεμβάσεων NBS, συμπεριλαμβανομένων υδρολογικών μοντέλων όπως τα HEC-HMS (Agarwal et al., 2024) και Dynamic Topmodel (Hankin et al., 2021), καθώς και υδραυλικών μοντέλων όπως τα HEC-RAS, MIKE 11, SWAT, TUFLOW και Flood Modeller (Thomas & Nisbet, 2006; Fennell et al., 2023; Yeo et al., 2019; Spyrou et al., 2021; Lavers et al., 2022). Σε ένα εναλλακτικό πλαίσιο, έχουν εισαχθεί πολυκλιμακικές τεχνικές μοντελοποίησης, όπως παρουσιάζεται από τους Joyce et al. (2017) και Bach et al. (2020). Η συνήθης μεθοδολογική προσέγγιση περιλαμβάνει αρχικά τη βαθμονόμηση των μοντέλων με ιστορικά δεδομένα πλημμυρών. Στη συνέχεια, σε περιοχές που κρίνονται κατάλληλες για την εφαρμογή NBS, προσαρμόζονται οι σχετικές παράμετροι των υδρολογικών και/ή υδραυλικών μοντέλων ώστε να αντανakλούν τις προτεινόμενες παρεμβάσεις. Η επίδραση αυτών των προσαρμογών αξιολογείται ως προς τον μετριασμό του πλημμυρικού κινδύνου, μέσω δεικτών όπως η εξασθένιση πλημμυρικών κυμάτων ή η μείωση του βάθους πλημμύρας (Lammers et al. 2024).

Βασικά στάδια της διαδικασίας προσομοίωσης περιλαμβάνουν:

1. Την ανάλυση της περιοχής μελέτης, με βάση τα αστικά χαρακτηριστικά και τα διαθέσιμα τοπογραφικά, γεωλογικά και υδρολογικά δεδομένα.
2. Την υδραυλική και υδρολογική προσομοίωση για επιλεγμένες περιόδους επαναφοράς.

3. Τη βαθμονόμηση των μοντέλων με ιστορικά δεδομένα πλημμυρών.
4. Την επιλογή και παραμετροποίηση κατάλληλων μέτρων NBS (τύποι και πιθανοί συνδυασμοί αυτών).
5. Την εκτίμηση της επικινδυνότητας και του πλημμυρικού κινδύνου στις περιοχές εφαρμογής των μέτρων NBS.



Σχήμα 19 Μεθοδολογικό πλαίσιο για την αξιολόγηση της αποδοτικότητας των NBS με βάση προσομοιώσεων και αριθμητικών αναλύσεων.

4.2 Υδρολογικά και υδραυλικά λογισμικά προσομοίωσης

Η προσομοίωση της αστικής απορροής και η αξιολόγηση μέτρων διαχείρισης ομβρίων υδάτων βασίζονται σε εξειδικευμένα λογισμικά εργαλεία, τα οποία επιτρέπουν την αναπαράσταση των υδρολογικών και υδραυλικών διεργασιών. Δύο από τα πλέον διαδεδομένα εργαλεία στον τομέα αυτό είναι το HEC-RAS και το EPA SWMM.

Το HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center – River Analysis System) αναπτύχθηκε από το U.S. Army Corps of Engineers (USACE) και χρησιμοποιείται ευρέως για την υδραυλική προσομοίωση ροής σε φυσικά και τεχνητά υδατορεύματα. Το μοντέλο χρησιμοποιείται ευρέως για τη χαρτογράφηση πλημμυρικού κινδύνου και την ανάλυση καταλήψεων πλημμυρικών ζωνών (floodway encroachment analysis) (Yadav and Singh 2025· Sabeti et al. 2024a· Sabeti et al. 2024b· Dysarz et al. 2025· FEMA 2021). Οι εφαρμογές του εκτείνονται από μικρής κλίμακας δενδριτικά συστήματα, όπως μη μετρημένες λεκάνες απορροής ή αγροτικές τάφρους (Sarchani et al. 2020), έως μεγάλης κλίμακας υδρογραφικά δίκτυα, όπως ο ποταμός Μισισσιπής (Remo et al. 2009). Το λογισμικό επιτρέπει την ανάλυση τόσο μόνιμης (steady flow) όσο και μη μόνιμης ροής (unsteady flow), καθώς και τη διδιάστατη προσομοίωση πλημμυρικών φαινομένων.

Η λειτουργία του HEC-RAS βασίζεται στην επίλυση των εξισώσεων Saint-Venant, οι οποίες περιγράφουν τη ροή ανοικτών αγωγών. Για την εφαρμογή του μοντέλου απαιτούνται δεδομένα γεωμετρίας της κοίτης (διατομές), υδραυλικών χαρακτηριστικών (συντελεστές τραχύτητας Manning), καθώς και υδρολογικών εισροών (παροχές ή υδρογραφήματα).

Στο πλαίσιο της διαχείρισης ομβρίων, το HEC-RAS χρησιμοποιείται κυρίως για:

- την προσομοίωση πλημμυρικών φαινομένων σε ποτάμια και ρέματα,
- την εκτίμηση της έκτασης κατάκλυσης,
- την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας μέτρων αντιπλημμυρικής προστασίας, συμπεριλαμβανομένων παρεμβάσεων τύπου NBS (π.χ. αποκατάσταση πλημμυρικών πεδίων).

Ιδιαίτερα η δυνατότητα δισδιάστατης προσομοίωσης καθιστά το εργαλείο κατάλληλο για την ανάλυση χωρικής κατανομής των πλημμυρικών φαινομένων σε αστικές και περιαστικές περιοχές.

Το EPA SWMM (Storm Water Management Model) αναπτύχθηκε από την United States Environmental Protection Agency και αποτελεί ένα από τα πλέον διαδεδομένα εργαλεία για την προσομοίωση της αστικής απορροής.

Το SWMM είναι ένα δυναμικό μοντέλο που προσομοιώνει:

- τη βροχόπτωση και τη μετατροπή της σε απορροή,
- τη ροή εντός του αστικού αποχετευτικού δικτύου,
- την αποθήκευση και καθυστέρηση της ροής,
- την ποιότητα των ομβρίων υδάτων.

Η λειτουργία του βασίζεται στον διαχωρισμό της περιοχής μελέτης σε υπολεκάνες απορροής, καθεμία από τις οποίες χαρακτηρίζεται από συγκεκριμένες παραμέτρους (έκταση, ποσοστό στεγανών επιφανειών, κλίση, τραχύτητα). Το μοντέλο υπολογίζει την επιφανειακή απορροή λαμβάνοντας υπόψη διεργασίες όπως η διήθηση, η εξατμισοδιαπνοή και η αποθήκευση σε επιφανειακές καταθλίψεις.

Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα του SWMM είναι η δυνατότητα ενσωμάτωσης μέτρων χαμηλής επίπτωσης (Low Impact Development – LID), τα οποία αντιστοιχούν σε NBS, όπως:

- πράσινες στέγες,
- διαπερατά πεζοδρόμια,
- βιοκράσπεδα και δεξαμενές κατακράτησης.

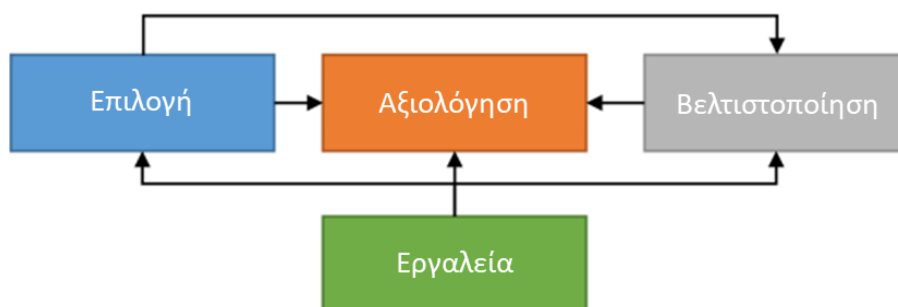
Μέσω της προσομοίωσης αυτών των παρεμβάσεων, το SWMM επιτρέπει την ποσοτικοποίηση της μείωσης της απορροής, της καθυστέρησης της αιχμής πλημμύρας και της βελτίωσης της ποιότητας των υδάτων.

Τα δύο λογισμικά εξυπηρετούν διαφορετικούς αλλά συμπληρωματικούς σκοπούς. Το HEC-RAS επικεντρώνεται κυρίως στην υδραυλική ανάλυση της ροής σε υδατορεύματα και στην εκτίμηση της πλημμυρικής έκτασης, ενώ το SWMM εστιάζει στην υδρολογική

προσομοίωση της αστικής απορροής και στη λειτουργία των αποχετευτικών δικτύων. Συνεπώς, σε ένα ολοκληρωμένο μεθοδολογικό πλαίσιο, τα δύο εργαλεία μπορούν να χρησιμοποιηθούν συνδυαστικά, παρέχοντας μια ολοκληρωμένη εικόνα των υδρολογικών και υδραυλικών διεργασιών και συμβάλλοντας στην ολιστική αξιολόγηση των Nature-Based Solutions.

4.2 Σχεδιασμός, επιλογή, αξιολόγηση και υλοποίηση των NBS

Μία τυπική διαδικασία για την επιλογή και την αξιολόγηση των Λύσεων Βασισμένων στη Φύση απεικονίζεται στο Σχήμα 3.8 (Ruangran και συν., 2020). Η διαδικασία ξεκινά με την επιλογή πιθανών μέτρων που ανταποκρίνονται στα τοπικά χαρακτηριστικά και στους στόχους του έργου. Το επόμενο στάδιο αφορά στην αξιολόγηση της απόδοσης των μέτρων με τη χρήση αριθμητικών μοντέλων, ανάλυσης κόστους-οφέλους και/ή πολυκριτηριακής ανάλυσης. Για πιο σύνθετα συστήματα, με μεγάλο αριθμό σεναρίων και παραμέτρων, μπορεί να εφαρμοστεί βελτιστοποίηση προκειμένου να μεγιστοποιηθούν τα οφέλη και να ελαχιστοποιηθούν τα κόστη. Στην εργασία των Ruangran και συν. (2020) εξετάστηκαν οι τεχνικές, οι μέθοδοι και τα εργαλεία για τον σχεδιασμό, την επιλογή, την αξιολόγηση και την υλοποίηση Λύσεων Βασισμένων στη Φύση.



Σχήμα 20 Διαδικασία αξιολόγησης Λύσεων Βασισμένων στη Φύση η οποία περιλαμβάνει την επιλογή των πιθανών μέτρων NBS, την αξιολόγηση καθώς και την βελτιστοποίηση της απόδοσής τους με τη χρήση διαθέσιμων εργαλείων. (Ruangran et al., 2020)

4.2.1 Επιλογή των NBS

Πρώτο βήμα στην επιλογή των πιθανών NBS αποτελεί ο σαφής καθορισμός του στόχου, όπως η περιοχή εφαρμογής (π.χ. αστική ή αγροτική) και οι απαιτήσεις απόδοσης, που μπορεί να αφορούν την ποσότητα και/ή την ποιότητα. Μια εναλλακτική προσέγγιση αποτελεί η συνεκτίμηση τόσο των πρωτογενών ωφελειών όσο και των βασικών συμπληρωματικών ωφελειών.

Πολλοί ερευνητές προτείνουν τον περιορισμό των κατάλληλων επιλογών βάσει των τοπικών περιορισμών, όπως η χρήση γης, ο τύπος εδάφους, το βάθος του υπογείου υδροφόρου ορίζοντα, τα χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής, οι πολιτικοί και οικονομικοί κανονισμοί, οι διαθέσιμες υποδομές και οι περιβαλλοντικές απαιτήσεις, καθώς και ο διαθέσιμος χώρος.

Συνεπώς, η διενέργεια προκαταρκτικής αξιολόγησης (screening analysis) είναι απαραίτητη για την επιλογή των καταλληλότερων μέτρων, τα οποία ανταποκρίνονται στους τοπικούς περιορισμούς και στους επιδιωκόμενους στόχους, παρέχοντας παράλληλα πολύτιμη πληροφόρηση στους φορείς λήψης αποφάσεων. Τέλος, μια σύγχρονη κατεύθυνση στην επιλογή λύσεων βασισμένων στη φύση είναι η ενσωμάτωση αρχών χωρικού σχεδιασμού για τον καθορισμό της θέσης των μέτρων. Οι αρχές αυτές μπορούν να διευκολύνουν και να ενισχύσουν τον διάλογο μεταξύ τοπικών κοινοτήτων, ερευνητών, φορέων χάραξης πολιτικής και δημόσιων αρχών (Ruangpan et al., 2020).

4.2.2 Αξιολόγηση των NBS

Μία από τις πλέον διαδεδομένες προσεγγίσεις αξιολόγησης της απόδοσης των Λύσεων Βασισμένων στη Φύση, είναι η προσομοίωση και ανάλυση υδρολογικών και υδραυλικών διεργασιών, καθώς και του υδατικού ισοζυγίου. Οι πληροφορίες αυτές αξιοποιούνται για την υποστήριξη των φορέων λήψης αποφάσεων, των σχεδιαστών και των ενδιαφερόμενων μερών μέσω της σύγκρισης των αποτελεσμάτων των μοντέλων με την υφιστάμενη κατάσταση, ένα σενάριο αναφοράς ή προκαθορισμένους στόχους (Jia και συν., 2015).

Εκτός από τις υδρολογικές και υδραυλικές αναλύσεις, χρησιμοποιείται ευρέως και η ανάλυση κόστους – οφέλους για την επιλογή και την αξιολόγηση της απόδοσης των Λύσεων Βασισμένων στη Φύση (Huang et al., 2018; Nordman et al., 2018; Watson et al.,

2016; Webber et al., 2018). Τα συνήθη οφέλη που λαμβάνονται υπόψη περιλαμβάνουν το αποτρεπόμενο κόστος ζημιών, την αποφυγή κατασκευής υποδομών και τη μείωση απωλειών στον αγροτικό τομέα. Μία χαρακτηριστική προσέγγιση είναι η εκτίμηση μέσω της ανάλυσης κόστους κύκλου ζωής (Life Cycle Costing – LCC), η οποία περιλαμβάνει το κόστος κατασκευής, λειτουργίας, συντήρησης και ευκαιρίας (Nordman και συν., 2018), καθώς και την απόδοση της επένδυσης (Return on Investment – ROI, De Risi και συν., 2018).

Μια ακόμη σημαντική μέθοδος είναι η πολυκριτηριακή ανάλυση (Multi-Criteria Analysis – MCA), η οποία έχει τη δυνατότητα να γεφυρώσει τις διαφορές μεταξύ κοινωνικών και τεχνικών προσεγγίσεων (Loc et al., 2017). Η μέθοδος αυτή συμβάλλει στη δομή σύνθετων προβλημάτων και στην καλύτερη κατανόηση των σχετικών κόστους και ωφελειών, ιδίως σε περιπτώσεις όπου πρέπει να ληφθούν υπόψη πολλαπλά και ενίοτε αντικρουόμενα κριτήρια (Alves et al., 2018b; Loos & Rogers, 2016). Στο πλαίσιο της MCA, διαφορετικά κριτήρια αξιολογούνται και σταθμίζονται, οδηγώντας σε κατάταξη των εναλλακτικών μέτρων (Chow et al., 2014; Jia et al., 2015). Ενδεικτικά, έχουν αναπτυχθεί εφαρμογές που συνδυάζουν αποτελέσματα αριθμητικής μοντελοποίησης και κοινωνικών ερευνών, αξιολογώντας εναλλακτικές λύσεις με βάση κριτήρια όπως η μείωση πλημμυρικού κινδύνου, η απομάκρυνση ρύπων και η αισθητική ποιότητα Loc και συν. (2017). Επιπλέον, η θεωρία πολυκριτηριακής χρησιμότητας (Multi-Attribute Utility Theory – MAUT) χρησιμοποιείται για την εκτίμηση των τιμών χρησιμότητας των εναλλακτικών λύσεων (Loos & Rogers, 2016).

Στις περιπτώσεις όπου δεν είναι δυνατή η πλήρης αξιολόγηση αποκλειστικά μέσω αριθμητικών προσομοιώσεων και αναλύσεων, απαιτούνται πολύ συχνά συνεντεύξεις και επιτόπια έρευνα. Για παράδειγμα, έχουν χρησιμοποιηθεί σύνολα ερωτήσεων που καλύπτουν θεματικές όπως η προσβασιμότητα, οι δραστηριότητες, οι δημόσιες υποδομές, η περιβαλλοντική ποιότητα, η οικολογική αξία και η αντιπλημμυρική προστασία, με στόχο την ποιοτική αξιολόγηση παρεμβάσεων όπως η αποκτάσταση ποταμών (Chou, 2016). Παράλληλα, ορισμένες μέθοδοι είναι κατάλληλες μόνο για εφαρμογές μικρής κλίμακας και δεν μπορούν να επεκταθούν σε μεγάλες λεκάνες απορροής. Σε αυτό το πλαίσιο, έχουν προταθεί μέθοδοι σχετικής αξιολόγησης απόδοσης (Relative Performance

Evaluation – RPE), οι οποίες βασίζονται σε βαθμολόγηση και στον υπολογισμό συνολικού δείκτη μέσω σταθμισμένου αθροίσματος επιμέρους δεικτών και χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση της απόδοσης όλων των πιθανών εναλλακτικών σεναρίων (Yang et al., 2018).

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι εξακολουθούν να υφίστανται σημαντικές προκλήσεις, όπως η αποτίμηση άυλων ωφελειών των λύσεων βασισμένων στη φύση και η ενσωμάτωση των προτιμήσεων των εμπλεκόμενων μερών στη διαδικασία αξιολόγησης. Επιπλέον, για σύνθετα συστήματα με μεγάλο αριθμό σεναρίων και παραμέτρων, οι απλές δοκιμές τύπου trial-and-error δεν είναι επαρκείς. Σε τέτοιες περιπτώσεις, η χρήση αυτοματοποιημένων μεθόδων βελτιστοποίησης μπορεί να αποδειχθεί ιδιαίτερα αποτελεσματική, επιτρέποντας τον συνδυασμό των προαναφερθεισών προσεγγίσεων. Τέλος, παραμένει πρόκληση η ενσωμάτωση, σε ένα ενιαίο πλαίσιο ανάλυσης, παραμέτρων που μπορούν και δεν μπορούν να αποτιμηθούν σε χρηματικούς όρους (Ruangpan et al., 2020).

4.2.3 Βελτιστοποίηση των NBS

Οι περισσότερες μελέτες διαχείρισης ομβρίων υδάτων με τη χρήση των Λύσεων Βασισμένων στη Φύση, επικεντρώνονται στη μείωση της ποσότητας απορροής και στη βελτίωση της ποιότητας του νερού, μέσω της επιλογής του τύπου, του σχεδιασμού, του μεγέθους και της θέσης των μέτρων (Behroozi et al., 2018; Gao et al., 2015; Giacomoni & Joseph, 2017; Zhang & Chui, 2018). Στο πλαίσιο αυτό, έχουν αναπτυχθεί μοντέλα βελτιστοποίησης με διαφορετικές δομές, στόχους και συνιστώσες κατανομής (Zhang & Chui, 2018).

Ένα ολοκληρωμένο σύστημα μοντελοποίησης αναφέρεται συνήθως σε εργαλεία βελτιστοποίησης που συνδυάζουν εύχρηστα περιβάλλοντα εφαρμόζοντας ντετερμινιστικά μοντέλα. Ενδεικτικά παραδείγματα αποτελούν το SUSTAIN (System for Urban Stormwater Treatment and Analysis IntegratioN; Zhang & Chui, 2018) και τα συστήματα υποστήριξης αποφάσεων για βέλτιστες πρακτικές διαχείρισης (BMPDSS; Gao et al., 2015). Το μοντέλο SUSTAIN, το οποίο αναπτύχθηκε από την Υπηρεσία Προστασίας

Περιβάλλοντος των ΗΠΑ (US EPA), στοχεύει στην υποστήριξη της διαδικασίας επιλογής και χωροθέτησης μέτρων, καθώς και στη βελτιστοποίηση της υδρολογικής απόδοσης και της οικονομικής αποδοτικότητας των λύσεων σε αστικές λεκάνες απορροής (Leslie et al., 2009; Li et al., 2018). Πολλές εφαρμογές του SUSTAIN εστιάζουν στην ελαχιστοποίηση του κόστους, λαμβάνοντας υπόψη τόσο την ποσότητα απορροής (όγκος και αιχμή παροχής) όσο και την ποιότητά της (Gao et al., 2015; Li et al., 2018). Ωστόσο, τα συστήματα αυτά δεν είναι πάντοτε εύκολα προσαρμόσιμα στις ειδικές απαιτήσεις των χρηστών.

Μια εναλλακτική προσέγγιση είναι τα ολοκληρωμένα εργαλεία μοντέλου–αλγορίθμου, τα οποία συνδυάζουν αριθμητικά (υδρολογικά–υδροδυναμικά) μοντέλα με εξειδικευμένους αλγορίθμους που χρησιμοποιούνται για την επίλυση προβλημάτων πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης (Ruangran και συν., 2020). Ιδιαίτερα διαδεδομένη είναι η χρήση εξελικτικών αλγορίθμων πολλαπλών στόχων, όπως ο μη κυριαρχούμενης ταξινόμησης γενετικός αλγόριθμος II (NSGA-II), ο οποίος έχει αποδειχθεί ιδιαίτερα αποτελεσματικός ως προς το σύνολο των παραγόμενων λύσεων (Wang και συν., 2015). Ο NSGA-II έχει χρησιμοποιηθεί σε πλήθος εφαρμογών, όπως η ελαχιστοποίηση της απορροής σε συνδυασμό με τη μεγιστοποίηση της ποιότητας του νερού και της αξιοπιστίας του συστήματος (Oraei Zare et al., 2012), η ελαχιστοποίηση του κόστους ζημιών από πλημμύρες και του κόστους των μέτρων (Karamouz & Nazif, 2013), καθώς και η βελτιστοποίηση της οικονομικής αποδοτικότητας στρατηγικών αλλαγής χρήσεων γης (Yazdi & Salehi Neyshabouri, 2014). Στις περισσότερες περιπτώσεις, ο αλγόριθμος αυτός συνδυάζεται με το μοντέλο Storm Water Management Model (SWMM), το οποίο έχει αναπτυχθεί από την US EPA, για την επίλυση των προβλημάτων βελτιστοποίησης (Cipolla et al., 2016; JLi et al., 2018; Mei et al., 2018; Tao et al., 2017; Wu et al., 2018; Yang et al., 2018; Zhu & Chen, 2017).

Επιπλέον, χρησιμοποιούνται μέθοδοι βελτιστοποίησης βασισμένες σε σμήνη σωματιδίων (Particle Swarm Optimisation – PSO). Παραλλαγές όπως το τροποποιημένο PSO (MPSO) και το πολυκριτηριακό PSO (MOPSO) έχουν εφαρμοσθεί για την επίλυση προβλημάτων πολλαπλών στόχων, όπως η βελτιστοποίηση του σχεδιασμού δεξαμενών συγκράτησης

(Duan et al., 2016) ή η μείωση της αιχμής παροχής και της συγκέντρωσης αιωρούμενων στερεών μέσω κατάλληλων συνδυασμών μέτρων (Behroozi και συν., 2018) αντιστοίχως.

Ένας ακόμη αλγόριθμος που χρησιμοποιείται είναι η προσομοιωμένη ανόπτηση (Simulated Annealing – SA), μια πιθανοκρατική μέθοδος βελτιστοποίησης βασισμένη σε θερμοδυναμικές αρχές. Η μέθοδος αυτή έχει εφαρμοστεί σε συνδυασμό με το SWMM για τη μεγιστοποίηση του λόγου κόστους–οφέλους σε παρεμβάσεις αντιπλημμυρικής προστασίας και για τη βελτιστοποίηση της χωροθέτησης μέτρων, λαμβάνοντας υπόψη στόχους όπως η ελαχιστοποίηση του βάθους, της διάρκειας και της έκτασης πλημμυρικών φαινομένων (Huang et al., 2018; Chen et al., 2017).

Από τη σχετική βιβλιογραφία προκύπτει ότι τα περισσότερα μοντέλα βελτιστοποίησης, είτε πρόκειται για ολοκληρωμένα συστήματα είτε για συνδυασμούς μοντέλων και αλγορίθμων, βασίζονται στο SWMM για τη διαχείριση αστικών όμβριων υδάτων. Ωστόσο, παρατηρείται έλλειψη ερευνών που να αξιοποιούν τη βελτιστοποίηση για τη μεγιστοποίηση της αποτελεσματικότητας των λύσεων σε μεγαλύτερη κλίμακα, καθώς και για την ενσωμάτωση συμπληρωματικών ωφελειών στη διαδικασία βελτιστοποίησης. Επιπλέον, η χρήση δισδιάστατων μοντέλων παραμένει περιορισμένη, παρά τη σημασία τους για την ακριβέστερη εκτίμηση των ζημιών από πλημμύρες και των επιπτώσεων που σχετίζονται με τη διάδοση των πλημμυρικών φαινομένων (Ruangpan και συν., 2020).

4.2.3 Εργαλεία για την επιλογή, την αξιολόγηση και τη λειτουργία των NBS

Τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί διάφορα εργαλεία επιλογής και αξιολόγησης, με στόχο την υποστήριξη των εμπλεκόμενων φορέων στη διαδικασία προκαταρκτικής διερεύνησης, επιλογής και οπτικοποίησης λύσεων βασισμένων στη φύση. Ενδεικτικά παραδείγματα διαδικτυακών εφαρμογών που έχουν σχεδιαστεί για την επιλογή αστικών παρεμβάσεων είναι τα green–blue design tool, PEARL KB, Climate Adaptation App και Naturally Resilient Communities Solutions. Τα εργαλεία αυτά επιτρέπουν στους χρήστες να φιλτράρουν εναλλακτικές λύσεις με βάση τον τύπο προβλήματος, το είδος του μέτρου, τη χρήση γης, την κλίμακα και τη γεωγραφική θέση. Αποτελούν ουσιαστικά εργαλεία υποστήριξης αποφάσεων (decision-support tools) προσανατολισμένα στην επιλογή και

προκατακρκτική αξιολόγηση των λύσεων (Ruangran και συν., 2020). Παρότι τα εν λόγω εργαλεία παρέχουν ποιοτική ή ημι-ποσοτική αξιολόγηση των λύσεων βασισμένων στη φύση, ενσωματώνοντας συχνά πολιτικές, κοινωνικές και περιβαλλοντικές παραμέτρους, δεν υποστηρίζουν λεπτομερή φυσικοβασισμένη προσομοίωση ούτε επιτρέπουν την εκτέλεση ακριβών υδραυλικών και υδρολογικών υπολογισμών.

Πέραν αυτών, υπάρχουν εργαλεία που συνδυάζουν τις διαδικασίες επιλογής και αξιολόγησης, λειτουργώντας ως συστήματα υποστήριξης σχεδιασμού. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το εργαλείο SUDSLOC, το οποίο βασίζεται σε περιβάλλον GIS και συνδέεται με ολοκληρωμένα υδραυλικά μοντέλα (μονοδιάστατα για δίκτυα αποχέτευσης και δισδιάστατα για επιφανειακή απορροή). Το UrbanBEATS (Urban Biophysical Environments and Technologies Simulator) στοχεύει στην υποστήριξη του σχεδιασμού και της εφαρμογής υποδομών βιώσιμης διαχείρισης αστικών υδάτων (Kuller και συν., 2018). Άλλα εργαλεία που χρησιμοποιούνται για την επιλογή και αξιολόγηση παρεμβάσεων είναι το L-THIA-LID (Long-Term Hydrologic Impact Assessment – Low Impact Development; Ahiablame και συν., 2012; Liu και συν., 2015) και το Adaptation Support Tool (AST), το οποίο βασίζεται σε GIS (Voskamp και Van de Ven, 2015). Παρά τη χρησιμότητά τους, ορισμένα από τα εργαλεία αυτά δεν είναι κατάλληλα για όλες τις γεωγραφικές περιοχές ή κλίμακες εφαρμογής, καθώς ενδέχεται να βασίζονται σε δεδομένα ή συνθήκες συγκεκριμένων χωρών ή τύπων παρεμβάσεων.

Επιπλέον, μοντέλα όπως τα πακέτα MIKE της DHI (Semadeni-Davies και συν., 2008), το SWAT (Soil and Water Assessment Tool; Cheng και συν., 2017), το IHMORS (Herrera και συν., 2017) και το UWOT (Urban Water Optioneering Tool; Rozos και συν., 2013) μπορούν να αξιοποιηθούν αποτελεσματικά για την ανάλυση της αποδοτικότητας των λύσεων βασισμένων στη φύση.

Μέχρι σήμερα, ωστόσο, περιορισμένος αριθμός εργαλείων έχει αναπτυχθεί για την ποσοτικοποίηση των πολλαπλών ωφελειών των λύσεων σε χρηματικούς όρους, καθώς και για την αποτίμηση των ποιοτικών τους χαρακτηριστικών. Παραδείγματα αποτελούν το BeST (Benefits of SuDS Tool), το οποίο παρέχει μια δομημένη προσέγγιση αξιολόγησης των ωφελειών (Digman και συν., 2017; Donnell και συν., 2018; Fenner, 2017), και το MUSIC (Model for Urban Stormwater Improvement Conceptualization), ένα εννοιολογικό

εργαλείο σχεδιασμού που περιλαμβάνει και ενότητα ανάλυσης κόστους κύκλου ζωής (Khastagir και Jayasuriya, 2010; Schubert και συν., 2017). Άλλα εργαλεία που αφορούν τη μοντελοποίηση επιλογών διαχείρισης όμβριων υδάτων και την οικονομική αξιολόγηση αστικών παρεμβάσεων έχουν επίσης καταγραφεί στη βιβλιογραφία (Jayasooriya και Ng, 2014).

Ωστόσο, τα περισσότερα από τα διαθέσιμα εργαλεία επικεντρώνονται σε μικρής κλίμακας παρεμβάσεις, όπως βιοκατακράτηση, διαπερατά οδοστρώματα, πράσινες στέγες, τάφρους αποστράγγισης, δεξαμενές συγκράτησης, βιοδιήθηση και συλλογή όμβριων υδάτων. Αντιθέτως, περιορισμένα είναι τα εργαλεία που αφορούν μέτρα προστασίας από πλημμύρες ποταμών και παράκτιων περιοχών ή την αντιμετώπιση της ξηρασίας, ενώ ουσιαστικά απουσιάζουν εργαλεία για τη μείωση κινδύνων από κατολισθήσεις και θαλάσσια κύματα καταιγίδας. Επιπλέον, έχει επισημανθεί η έλλειψη ολοκληρωμένων συστημάτων πληροφόρησης, βάσεων δεδομένων και πλατφορμών ανταλλαγής γνώσης μεταξύ αρχών και επαγγελματιών (Kabisch και συν. 2016).

Τέλος, αναδεικνύεται η ανάγκη αξιοποίησης τεχνολογιών όπως αισθητήρες, ρυθμιστές, τηλεμετρία και συστήματα SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) για την αποδοτική λειτουργία και τον έλεγχο σε πραγματικό χρόνο των λύσεων βασισμένων στη φύση. Οι διατάξεις αυτές, που βασίζονται στον έλεγχο σε πραγματικό χρόνο, μπορούν να χαρακτηριστούν ως «έξυπνες» λύσεις βασισμένες στη φύση (SMART NBSs) και εμφανίζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον, ιδίως σε υβριδικά συστήματα όπου απαιτείται στενός συντονισμός μεταξύ διαφορετικών τύπων παρεμβάσεων (Ruangpan et al., 2020).

4.2 Συλλογή και επεξεργασία δεδομένων

Για την ανάπτυξη ενός αξιόπιστου μεθοδολογικού πλαισίου διαχείρισης ομβρίων υδάτων απαιτείται η συλλογή και επεξεργασία δεδομένων, η ποιότητα, η πληρότητα και η καταλληλότητα των οποίων επηρεάζουν άμεσα την ακρίβεια των υδρολογικών και υδραυλικών προσομοιώσεων, καθώς και την αξιοπιστία των εξαγόμενων συμπερασμάτων. Στο πλαίσιο μιας θεωρητικής προσέγγισης, η διαδικασία αυτή βασίζεται κυρίως στη

συλλογή και σύνθεση δευτερογενών δεδομένων από αξιόπιστες πηγές, καθώς και στην αξιοποίησή τους μέσω κατάλληλων μεθόδων και εργαλείων επεξεργασίας.

Τα δεδομένα που απαιτούνται για την ανάλυση μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε χωρικά, υδρολογικά, μετεωρολογικά και τεχνικά. Τα χωρικά δεδομένα περιλαμβάνουν πληροφορίες σχετικές με τις χρήσεις γης, την κάλυψη εδάφους, τα ψηφιακά μοντέλα εδάφους (Digital Elevation Models – DEM), τις κλίσεις του εδάφους, καθώς και το ποσοστό των αδιαπέραστων επιφανειών. Τα δεδομένα αυτά είναι απαραίτητα για την κατανόηση της χωρικής κατανομής της απορροής και για την οριοθέτηση των λεκανών απορροής. Η επεξεργασία τους πραγματοποιείται συνήθως με τη χρήση Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (GIS), τα οποία επιτρέπουν τη χωρική ανάλυση και τη συσχέτιση διαφορετικών επιπέδων πληροφορίας.

Τα υδρολογικά δεδομένα αποτελούν βασικό στοιχείο για την προσομοίωση της επιφανειακής απορροής. Σε αυτά περιλαμβάνονται δεδομένα βροχόπτωσης, όπως η ένταση, η διάρκεια και η συχνότητα των κατακρημνισμάτων, καθώς και πληροφορίες για ιστορικά πλημμυρικά γεγονότα. Ιδιαίτερη σημασία έχουν οι καμπύλες έντασης–διάρκειας–συχνότητας (IDF), οι οποίες χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό ακραίων βροχοπτώσεων και την εκτίμηση της απορροής για διαφορετικές περιόδους επαναφοράς. Επιπλέον, υπολογίζονται βασικές υδρολογικές παράμετροι, όπως ο συντελεστής απορροής, ο οποίος εκφράζει το ποσοστό της βροχόπτωσης που μετατρέπεται σε επιφανειακή απορροή (Chow et al., 1988).

Συμπληρωματικά, τα μετεωρολογικά δεδομένα, όπως η θερμοκρασία και η εξατμισοδιαπνοή, συμβάλλουν στην πληρέστερη κατανόηση του υδρολογικού κύκλου, ιδίως σε σχέση με τις διεργασίες απώλειας νερού. Η ενσωμάτωση αυτών των δεδομένων είναι ιδιαίτερα σημαντική για την αξιολόγηση της απόδοσης των NBS, καθώς πολλά από αυτά βασίζονται σε φυσικές διεργασίες όπως η διήθηση και η εξατμισοδιαπνοή.

Τα τεχνικά δεδομένα περιλαμβάνουν πληροφορίες για τα υφιστάμενα δίκτυα αποχέτευσης, τις υποδομές διαχείρισης ομβρίων υδάτων, καθώς και τον αστικό σχεδιασμό. Τα δεδομένα αυτά είναι απαραίτητα για την κατανόηση της υφιστάμενης κατάστασης και για την αξιολόγηση της δυνατότητας ενσωμάτωσης μέτρων NBS στον αστικό ιστό.

Οι πηγές των δεδομένων περιλαμβάνουν εθνικές μετεωρολογικές υπηρεσίες, διεθνείς οργανισμούς όπως η World Meteorological Organization, καθώς και ευρωπαϊκές βάσεις δεδομένων όπως η European Environment Agency. Επιπλέον, σημαντική πηγή πληροφορίας αποτελούν τα δορυφορικά δεδομένα, όπως αυτά που παρέχονται από το πρόγραμμα Copernicus, καθώς και η σχετική επιστημονική βιβλιογραφία.

Η επεξεργασία των δεδομένων περιλαμβάνει αρχικά στάδια προεπεξεργασίας, όπως ο έλεγχος ποιότητας, η διαχείριση ελλιπών τιμών και η ανίχνευση ακραίων τιμών (outliers). Στη συνέχεια, πραγματοποιείται ομογενοποίηση των δεδομένων ως προς τις χρονικές και χωρικές κλίμακες, καθώς και μετατροπή των μονάδων όπου απαιτείται. Ακολουθεί η χωρική ανάλυση, κατά την οποία προσδιορίζονται κρίσιμες παράμετροι, όπως το ποσοστό των αδιαπέραστων επιφανειών και τα χαρακτηριστικά των λεκανών απορροής.

Παράλληλα, εφαρμόζονται στατιστικές μέθοδοι για την ανάλυση των υδρολογικών δεδομένων, όπως η επεξεργασία χρονοσειρών βροχόπτωσης και η ανάπτυξη ή χρήση καμπυλών IDF. Τα επεξεργασμένα δεδομένα χρησιμοποιούνται στη συνέχεια για την παραμετροποίηση υδρολογικών και υδραυλικών μοντέλων, όπως το EPA SWMM, το οποίο χρησιμοποιείται ευρέως για την προσομοίωση της απορροής σε αστικά περιβάλλοντα και την αξιολόγηση μέτρων διαχείρισης ομβρίων.

Τέλος, είναι σημαντικό να λαμβάνονται υπόψη οι αβεβαιότητες που σχετίζονται με τα δεδομένα και τις μεθόδους επεξεργασίας. Οι αβεβαιότητες αυτές μπορεί να προκύπτουν από σφάλματα μετρήσεων, ελλιπή δεδομένα ή απλουστευτικές παραδοχές των μοντέλων. Για την αντιμετώπισή τους, μπορούν να εφαρμοστούν μέθοδοι όπως η ανάλυση ευαισθησίας και η ανάπτυξη εναλλακτικών σεναρίων. Η αναγνώριση και η διαχείριση των αβεβαιοτήτων είναι απαραίτητη για την ενίσχυση της αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων και την ορθή αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας των NBS.

4.3 Αβεβαιότητες και ποιότητα δεδομένων

Η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από υδρολογικές και υδραυλικές προσομοιώσεις εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ποιότητα των δεδομένων εισόδου και τον βαθμό κατανόησης των σχετικών αβεβαιοτήτων. Στο πλαίσιο της διαχείρισης ομβρίων υδάτων και της αξιολόγησης των NBS, η διερεύνηση και η αντιμετώπιση των αβεβαιοτήτων αποτελεί κρίσιμο στοιχείο της μεθοδολογίας.

Οι αβεβαιότητες μπορούν να ταξινομηθούν σε διάφορες κατηγορίες. Καταρχάς, σημαντική πηγή αβεβαιότητας αποτελεί η ποιότητα των μετρητικών δεδομένων, όπως τα δεδομένα βροχόπτωσης και απορροής, τα οποία ενδέχεται να περιλαμβάνουν σφάλματα μέτρησης, ελλιπείς χρονοσειρές ή περιορισμένη χωρική αντιπροσώπευση. Επιπλέον, η χρήση δευτερογενών δεδομένων από διαφορετικές πηγές μπορεί να εισάγει ασυνέπειες ως προς τη χρονική και χωρική ανάλυση.

Μία δεύτερη κατηγορία αφορά τις δομικές αβεβαιότητες των μοντέλων, οι οποίες σχετίζονται με τις απλουστευτικές παραδοχές που υιοθετούνται κατά την προσομοίωση πολύπλοκων φυσικών διεργασιών. Για παράδειγμα, η αναπαράσταση της επιφανειακής απορροής, της διήθησης και της εξατμισοδιαπνοής βασίζεται σε θεωρητικά μοντέλα που ενδέχεται να μην αποτυπώνουν πλήρως την πραγματική συμπεριφορά του συστήματος.

Επιπρόσθετα, σημαντική είναι και η παραμετρική αβεβαιότητα, η οποία προκύπτει από την εκτίμηση των παραμέτρων των μοντέλων, όπως ο συντελεστής απορροής ή οι συντελεστές τραχύτητας. Η έλλειψη ακριβών μετρήσεων οδηγεί συχνά στην υιοθέτηση τιμών από τη βιβλιογραφία, γεγονός που ενδέχεται να επηρεάσει την ακρίβεια των αποτελεσμάτων.

Η διασφάλιση της ποιότητας των δεδομένων προϋποθέτει την εφαρμογή διαδικασιών ελέγχου, όπως η ανίχνευση ακραίων τιμών, η συμπλήρωση ελλিপών δεδομένων και η διασταύρωση πληροφοριών από πολλαπλές πηγές. Παράλληλα, η εφαρμογή αναλύσεων ευαισθησίας και η ανάπτυξη εναλλακτικών σεναρίων συμβάλλουν στην κατανόηση της επίδρασης των αβεβαιοτήτων στα αποτελέσματα των προσομοιώσεων. Η συστηματική αντιμετώπιση των παραπάνω ζητημάτων ενισχύει την αξιοπιστία των εκτιμήσεων και επιτρέπει την ορθολογική αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας των NBS.

4.4 Ανάπτυξη σεναρίων και δείκτες αξιολόγησης

Η ανάπτυξη σεναρίων αποτελεί βασικό στάδιο στο μεθοδολογικό πλαίσιο αξιολόγησης των NBS, καθώς επιτρέπει τη συστηματική διερεύνηση της απόδοσής τους υπό διαφορετικές συνθήκες και παραμέτρους. Μέσω της δημιουργίας εναλλακτικών σεναρίων προσομοίωσης καθίσταται δυνατή η σύγκριση μεταξύ της υφιστάμενης κατάστασης και διαφόρων παρεμβάσεων, συμβάλλοντας στην τεκμηριωμένη λήψη αποφάσεων για τη διαχείριση ομβρίων υδάτων.

Αρχικά, ορίζεται το βασικό σενάριο αναφοράς (baseline scenario), το οποίο αναπαριστά την υφιστάμενη κατάσταση χωρίς την εφαρμογή μέτρων NBS. Το σενάριο αυτό βασίζεται στα επεξεργασμένα δεδομένα της περιοχής μελέτης και χρησιμοποιείται ως σημείο αναφοράς για τη σύγκριση των αποτελεσμάτων. Στη συνέχεια, αναπτύσσονται εναλλακτικά σενάρια που περιλαμβάνουν την εφαρμογή διαφορετικών τύπων και συνδυασμών NBS, όπως πράσινες στέγες, διαπερατές επιφάνειες, βιοκράσπεδα και δεξαμενές κατακράτησης.

Η διαμόρφωση των σεναρίων πραγματοποιείται λαμβάνοντας υπόψη τόσο τα χωρικά χαρακτηριστικά της περιοχής όσο και τις υδρολογικές συνθήκες, όπως διαφορετικές περιόδους επαναφοράς βροχοπτώσεων. Με τον τρόπο αυτό, εξασφαλίζεται η αξιολόγηση των παρεμβάσεων υπό ποικίλες και ενδεχομένως ακραίες συνθήκες, οι οποίες σχετίζονται με την κλιματική μεταβλητότητα και την αυξανόμενη συχνότητα έντονων καιρικών φαινομένων.

Η προσομοίωση των σεναρίων πραγματοποιείται με τη χρήση υδρολογικών και υδραυλικών μοντέλων, όπως το EPA SWMM και το HEC-RAS, τα οποία επιτρέπουν την ποσοτικοποίηση των επιπτώσεων των NBS στη διαχείριση της απορροής και στον περιορισμό του πλημμυρικού κινδύνου. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων περιλαμβάνουν μεταβλητές όπως ο όγκος απορροής, οι παροχές αιχμής, η χρονική καθυστέρηση της αιχμής και η έκταση της πλημμυρικής κατάκλυσης.

Για την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας των σεναρίων χρησιμοποιούνται κατάλληλοι δείκτες απόδοσης (performance indicators), οι οποίοι επιτρέπουν την

ποσοτική και συγκριτική ανάλυση των αποτελεσμάτων. Οι δείκτες αυτοί μπορούν να ταξινομηθούν σε υδρολογικούς, περιβαλλοντικούς και οικονομικούς.

Οι υδρολογικοί δείκτες περιλαμβάνουν τη μείωση του όγκου απορροής, τη μείωση της παροχής αιχμής και την αύξηση του χρόνου συγκέντρωσης, οι οποίοι σχετίζονται άμεσα με την ικανότητα των NBS να περιορίζουν τα πλημμυρικά φαινόμενα. Οι περιβαλλοντικοί δείκτες αφορούν τη βελτίωση της ποιότητας των υδάτων, την ενίσχυση της βιοποικιλότητας και τη συμβολή στη μείωση της αστικής θερμικής νησίδας. Παράλληλα, οι οικονομικοί δείκτες περιλαμβάνουν το κόστος κατασκευής και συντήρησης, καθώς και την αποδοτικότητα των επενδύσεων σε σχέση με τις παρεχόμενες υπηρεσίες οικοσυστήματος.

Επιπλέον, στο πλαίσιο της αξιολόγησης μπορεί να ενσωματωθούν σύνθετοι δείκτες ή πολυκριτηριακές μέθοδοι ανάλυσης, οι οποίες επιτρέπουν τη συνεκτίμηση διαφορετικών παραμέτρων και την ιεράρχηση των εναλλακτικών λύσεων. Η προσέγγιση αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική στην περίπτωση των NBS, καθώς τα οφέλη τους είναι πολυδιάστατα και δεν περιορίζονται αποκλειστικά σε υδρολογικές επιδόσεις.

Τέλος, η σύγκριση των σεναρίων οδηγεί στην εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την καταλληλότητα και την αποτελεσματικότητα των διαφορετικών παρεμβάσεων. Η διαδικασία αυτή συμβάλλει στην ανάδειξη βέλτιστων πρακτικών και στη διαμόρφωση στρατηγικών διαχείρισης ομβρίων υδάτων που βασίζονται σε Nature-Based Solutions, λαμβάνοντας υπόψη τόσο τις τοπικές συνθήκες όσο και τις προκλήσεις που συνδέονται με την κλιματική αλλαγή.

4.5 Παραδείγματα εφαρμογής των NBS σε αστικά περιβάλλοντα

Στο υποκεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστούν και θα αναλυθούν επιλεγμένες μελέτες από τη διεθνή βιβλιογραφία που αφορούν στην εφαρμογή του μοντέλου SWMM σε αστικές περιοχές για την αξιολόγηση των NBS. Πίνακας 7 που ακολουθεί συνοψίζει επιλεγμένες αντιπροσωπευτικές μελέτες της κατηγορίας αυτής, εκ των οποίων τέσσερις παρουσιάζονται εκτενέστερα στη συνέχεια (τα αντίστοιχα άρθρα επισημαίνονται με

έντονη γραφή). Στόχος είναι η κατανόηση των μεθοδολογικών προσεγγίσεων, των παραμέτρων προσομοίωσης και των αποτελεσμάτων που προκύπτουν.

α/α	Αναφορά	Χώρα	Παρέμβαση
1	Yang et al. (2020)	Γερμανία	διηθητική τάφρος, διαπερατό οδόστρωμα δεξαμενή συλλογής βρόχινου νερού
2	Alemaw et al. (2020)	Μποτσουάνα	φυτεμένες τάφροι απορροής, τάφρος διήθησης, διαπερατά πεζοδρόμια
3	Ferreira et al. (2020)	Πορτογαλία	κατασκευή δύο φραγμάτων (ανάντη/κατάντη)
4	Ourloglou et al. (2020)	Ελλάδα	διεύρυνση κοίτης, εξομάλυνση πρανών, ανύψωση όχθων, αύξηση βλάστησης
5	Tara et al. (2020)	Νήσοι Σολομώντα	δεξαμενές καθυστέρησης, τάφροι σε λιβάδια
6	Vojinovic et al. (2021)	Ταϊλάνδη	<u>μικρής κλίμακας</u> : πράσινες στέγες, διαπερατά πεζοδρόμια, βιοκατακράτηση, τάφροι διήθησης <u>μεγάλης κλίμακας</u> : δεξαμενές αποθήκευσης, υγρότοποι κανάλια εκτροπής, διεύρυνση υφιστάμενων λιμνών/ ταμιευτήρων
7	Hankin et al. (2021)	Ηνωμένο Βασίλειο	επανασύνδεση πλημμυρικής πεδιάδας, εκτροπές ροής, αύξηση βλάστησης, φράγματα ξύλου κ.ά.
8	Peng et al. (2022)	Κίνα	λίμνες, δάσωση, στρατηγικές απορρόφησης, διεύρυνση ποταμού
9	Borst (2023)	Γκάνα	αστικό δάσος, αναβαθμίσεις, επαναφυσικοποίηση ποταμού, βιοκατακράτηση
10	Ferreira & da Rocha (2023)	Βραζιλία	Πράσινες στέγες, διαπερατά πεζοδρόμια
11	Espinal-Giron et al. (2023)	Κόστα Ρίκα	κήποι βροχής, πράσινες στέγες, διαπερατά πεζοδρόμια, λεκάνες βιοκατακράτησης, τάφροι διήθησης
12	Guido et al. (2023)	ΗΠΑ	δεξαμενή αποθήκευσης πλημμυρικού νερού εκτός κοίτης
13	Theochari & Baltas (2024)	Ελλάδα	αλλαγή χρήσεων γης
14	Sciuto et al. (2024)	Ιταλία	πράσινες στέγες, διαπερατά πεζοδρόμια, κήποι βροχής, δεξαμενές συλλογής βρόχινου νερού
15	Liao et al. (2024)	Ταϊβάν	δεξαμενές συγκράτησης, αναδάσωση

Πίνακας 7 Μελέτες εφαρμογής NBS για τη διαχείριση ομβρίων υδάτων σε αστικά περιβάλλοντα από τη διεθνή βιβλιογραφία

4.5.1 Παρουσίαση μελέτης: Yang και συν., 2020

Περιοχή μελέτης και στόχος

Στην μελέτη των Yang και συν. (2020) εξετάζεται η εφαρμογή λύσεων χαμηλού αντικτύπου (Low Impact Development – LID), ως μορφή Λύσεων Βασισμένων στη Φύση (NBS), σε μια αστική λεκάνη απορροής στην πόλη της Δρέσδης (Γερμανία). Η περιοχή μελέτης αφορά Πανεπιστημιακή εγκατάσταση έκτασης 0,85 km², με έντονα αστικοποιημένα χαρακτηριστικά και υψηλό ποσοστό αδιαπέρατων επιφανειών, γεγονός που ενισχύει την επιφανειακή απορροή.

Βασικός στόχος της έρευνας είναι η αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας των παρεμβάσεων NBS στη μείωση της απορροής ομβρίων υδάτων, καθώς και η διερεύνηση της βέλτιστης επιλογής μέσω ανάλυσης κόστους – αποτελεσματικότητας. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στη μακροχρόνια αξιολόγηση, μέσω υδρολογικών προσομοιώσεων μεγάλης χρονικής διάρκειας (2001 – 2015), ώστε να ξεπεραστούν οι περιορισμοί των βραχυχρόνιων προσεγγίσεων.

Μεθοδολογία

Η μεθοδολογία της μελέτης βασίζεται σε συνδυασμό υδρολογικής προσομοίωσης και ανάλυσης κόστους – αποτελεσματικότητας, με στόχο την ολοκληρωμένη αξιολόγηση των παρεμβάσεων NBS.

Για την προσομοίωση της επιφανειακής απορροής χρησιμοποιήθηκε το υδρολογικό μοντέλο Storm Water Management Model (SWMM) της Υπηρεσίας Προστασίας Περιβάλλοντος των ΗΠΑ (EPA).

Η ανάπτυξη του μοντέλου βασίστηκε σε πολλαπλές πηγές δεδομένων:

- γεωμετρικά δεδομένα δικτύου αποχέτευσης (αγωγοί, φρεάτια)
- ψηφιακό μοντέλο εδάφους (DEM),
- δορυφορικές εικόνες για τον προσδιορισμό χρήσεων γης
- υδρολογικά δεδομένα (χρονοσειρές βροχόπτωσης και παροχών εξόδου)

Η περιοχή μελέτης χωρίστηκε σε 30 υπολεκάνες, με παραμέτρους όπως ποσοστό στεγανότητας και κλίση επιφάνειας. Το αποχετευτικό δίκτυο αναπαραστάθηκε με κόμβους, αγωγούς και σημεία εκροής.

Για την απλοποίηση της προσομοίωσης υιοθετήθηκαν βασικές παραδοχές, όπως η χωρικά ομοιόμορφη βροχόπτωση και η απορροή προς το πλησιέστερο φρεάτιο.

Η βαθμονόμηση και επαλήθευση του μοντέλου πραγματοποιήθηκε με βάση παρατηρημένα δεδομένα απορροής. Χρησιμοποιήθηκαν επιλεγμένα επεισόδια βροχόπτωσης για τις περιόδους 2012 – 2013 (βαθμονόμηση) και 2014 – 2015 (επαλήθευση).

Η αξιολόγηση της απόδοσης του μοντέλου πραγματοποιήθηκε με στατιστικούς δείκτες, όπως:

- συντελεστής προσδιορισμού (R^2)
- ρίζα μέσου τετραγωνικού σφάλματος (RSME)
- συντελεστής Nash – Sutcliffe (NSE)

Οι υψηλές τιμές του R^2 ($>0,90$) υποδηλώνουν ικανοποιητική προσαρμογή του μοντέλου.

Επιλογή NBS – Σενάρια αξιολόγησης

Στη μελέτη επιλέχθηκαν τρεις βασικές πρακτικές NBS: (α) διηθητική τάφρος (Infiltration Trench – IT), (β) διαπερατό οδόστρωμα (Permeable Pavement – PP) και (γ) δεξαμενή συλλογής βρόχινου νερού (Rain Barrel – RB). Οι παρεμβασεις αυτές εφαρμόζονται είτε μεμονωμένα είτε συνδυαστικά, λαμβάνοντας υπόψη τα χαρακτηριστικά χρήσεων γης της περιοχής.

Συνολικά εξετάστηκαν επτά σενάρια εφαρμογής: τρία μεμονωμένα (IT, PP, RB) και τέσσερα συνδυαστικά (IT+RB, IT+PP, PP+RB, IT+PP+RB). Παράλληλα, διαμορφώθηκαν έξι σενάρια βροχόπτωσης διαφορετικής χρονικής διάρκειας (3, 6, 12, 60, 120 και 180 μήνες), προκειμένου να αξιολογηθεί η επίδραση της χρονικής κλίμακας στη λειτουργία των συστημάτων. Συγκεκριμένα αναπτύχθηκαν:

- έξι σενάρια βροχόπτωσης διαφορετικής διάρκειας (από 3 μήνες έως 15 έτη), βασισμένα σε ιστορικά δεδομένα,

- επτά σενάρια εφαρμογής NBS (μεμονωμένα και συνδυαστικά).

Οι προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν τόσο για την υφιστάμενη κατάσταση όσο και για κάθε σενάριο εφαρμογής, ώστε να υπολογιστεί η μεταβολή της απορροής.

Ο συνδυασμός των παραπάνω οδήγησε στην εκτέλεση 42 προσομοιώσεων.

Δείκτες αξιολόγησης

Η αξιολόγηση των NBS παρεμβάσεων βασίστηκε σε τεχνικούς και οικονομικούς δείκτες.

Η τεχνική απόδοση εκτιμήθηκε μέσω του ποσοστού μείωσης της απορροής (runoff removal rate), το οποίο υπολογίζεται ως η διαφορά μεταξύ της αρχικής και της τροποποιημένης απορροής μετά την εφαρμογή των μέτρων.

Η οικονομική αξιολόγηση πραγματοποιήθηκε με βάση το κόστος κύκλου ζωής (Life Cycle Cost – LCC), το οποίο περιλαμβάνει το αρχικό κόστος κατασκευής καθώς και τα κόστη λειτουργίας συντήρησης σε βάθος χρόνου.

Τέλος, για τη συνδυαστική εκτίμηση τεχνικής και οικονομικής απόδοσης χρησιμοποιήθηκε ο λόγος κόστους – αποτελεσματικότητας (Cost – Effectiveness ratio – C/E), όπου χαμηλότερες τιμές υποδηλώνουν πιο αποδοτικές λύσεις.

Η συνδυαστική αυτή προσέγγιση επιτρέπει την αξιολόγηση τόσο της τεχνικής όσο και της οικονομικής διάστασης των NBS, συμβάλλοντας στη βελτιστοποίηση της διαδικασίας λήψης αποφάσεων.

Αποτελέσματα – Συμπεράσματα

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι οι Λύσεις Βασισμένες στη Φύση, συμβάλλουν σημαντικά στη μείωση της επιφανειακής απορροής, με ποσοστά που κυμαίνονται περίπου μεταξύ 13% και 27%. Οι συνδυαστικές εφαρμογές εμφανίζουν υψηλότερη τεχνική απόδοση σε σχέση με τις μεμονωμένες, με τον συνδυασμό IT+PP+RB να παρουσιάζει τη μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα.

Ωστόσο, η χρονική διάρκεια των υδρολογικών σεναρίων επηρεάζει σημαντικά τα αποτελέσματα. Παρατηρείται έντονη μεταβλητότητα σε βραχυχρόνια σενάρια (<12 μήνες), ενώ σε μεγαλύτερες χρονικές κλίμακες (> 1 έτος) τα αποτελέσματα

σταθεροποιούνται, αναδεικνύοντας τη σημασία της μακροχρόνιας προσομοίωσης για την αξιόπιστη αξιολόγηση των NBS.

Σε όρους οικονομικής απόδοσης, η δεξαμενή συλλογής βρόχινου νερού (RB) αναδεικνύεται ως η πλέον αποδοτική λύση, λόγω του χαμηλού κόστους κατασκευής και συντήρησης. Αντίθετα, το διαπερατό οδόστρωμα (PP) παρουσιάζει τη χαμηλότερη αποδοτικότητα λόγω υψηλού κόστους. Παρά το γεγονός ότι ο συνδυασμός IT+PP+RB επιτυγχάνει τη μέγιστη τεχνική απόδοση, δεν αποτελεί την πλέον οικονομικά αποδοτική επιλογή.

Συνολικά, τα αποτελέσματα καταδεικνύουν ότι η επιλογή κατάλληλων μέτρων NBS δεν μπορεί να βασίζεται αποκλειστικά είτε στην τεχνική είτε στην οικονομική απόδοση. Αντίθετα, απαιτείται μια ολοκληρωμένη, πολυκριτηριακή προσέγγιση που να συνδυάζει και τις δύο διαστάσεις, υποστηρίζοντας έτσι πιο ορθολογικές διαδικασίες λήψης αποφάσεων στον αστικό σχεδιασμό.

Η έρευνα επικεντρώθηκε κυρίως στην επίδραση της μακροχρόνιας διάρκειας των βροχοπτώσεων στην απόδοση των πρακτικών NBS, ενώ η απόδοση αυτή δύναται να επηρεάζεται και από πλήθος άλλων παραγόντων (όπως τα πρότυπα βροχόπτωσης, οι διαστάσεις εγκατάστασης και οι τεχνικές παράμετροι των πρακτικών NBS), γεγονός που ενδέχεται να εισάγει αβεβαιότητες κατά την εφαρμογή τους.

Ως εκ τούτου, προτείνονται δύο βασικές κατευθύνσεις για μελλοντική έρευνα με στόχο την ενίσχυση της πληρότητας της παρούσας μελέτης. Ενδεικτικά, κρίνεται σκόπιμη η διεξαγωγή ανάλυσης αβεβαιότητας των προαναφερθέντων επιδραστικών παραγόντων, καθώς και η συνολική αξιολόγηση της απόδοσης των πρακτικών NBS μέσω της εξέτασης ευρύτερου φάσματος σεναρίων.

LID practice	Runoff volume removal rate					
	3 Mon ^a	6 Mon	12 Mon	60 Mon	120 Mon	180 Mon
IT	14.93%	18.60%	17.92%	16.48%	15.96%	16.36%
PP	12.93%	16.16%	15.51%	14.20%	13.75%	14.10%
RB	14.30%	17.85%	17.14%	15.74%	15.25%	15.64%
IT + PP	19.86%	23.73%	23.01%	21.51%	20.97%	21.40%
IT + RB	21.61%	25.68%	24.87%	23.30%	22.76%	23.23%
PP + RB	18.23%	21.98%	21.24%	19.77%	19.26%	19.68%
IT + PP + RB	23.24%	27.42%	26.64%	25.04%	24.46%	24.94%

^a Mon: month.

Πίνακας 8 Τεχνική απόδοση των επτά σεναρίων εφαρμογής NBS (Yang et al., 2020)

LID practice	C/E ratio ^a (%)					
	3 Mon	6 Mon	12 Mon	60 Mon	120 Mon	180 Mon
IT	1.55	1.25	1.29	1.41	1.45	1.42
PP	5.99	4.79	4.99	5.45	5.63	5.49
RB	0.41	0.32	0.34	0.37	0.38	0.37
IT + PP	5.07	4.24	4.37	4.68	4.80	4.70
IT + RB	1.35	1.13	1.17	1.25	1.28	1.25
PP + RB	4.56	3.79	3.92	4.21	4.32	4.23
IT + PP + RB	4.58	3.88	4.00	4.25	4.35	4.27

^a C/E ratio: Cost-effectiveness ratio.

Πίνακας 9 Αποτελέσματα της ανάλυσης του λόγου κόστους – αποτελεσματικότητας (Yang et al., 2020)

4.5.2 Παρουσίαση μελέτης: Vojinovic et al. (2021)

Περιοχή μελέτης και στόχος

Η μελέτη εξετάζει την αποτελεσματικότητα των NBS για τη διαχείριση του πλημμυρικού κινδύνου στην πόλη Ayutthaya της Ταϊλάνδης, μια περιοχή ευάλωτη σε πλημμύρες λόγω της γεωγραφικής της θέσης εντός του υδρογραφικού συστήματος του ποταμού Chao Phraya. Η πόλη βρίσκεται σε χαμηλό υψόμετρο (~4 m πάνω από τη μέση στάθμη της θάλασσας) και περιβάλλεται από τρεις ποταμούς, γεγονός που την καθιστά εκτεθειμένη τόσο σε ποτάμιες όσο και σε αστικές πλημμύρες.

Βασικός στόχος της μελέτης είναι η αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας διαφορετικών τύπων NBS (μικρής και μεγάλης κλίμακας), καθώς και των υβριδικών συνδυασμών τους με παραδοσιακές «γκρι» υποδομές, ως προς τη μείωση του πλημμυρικού κινδύνου. Παράλληλα, η έρευνα αποσκοπεί στην υποστήριξη της διαδικασίας λήψης αποφάσεων μέσω ενσωμάτωσης τεχνικών και κοινωνικών παραμέτρων.

Μεθοδολογία

Η μεθοδολογική προσέγγιση βασίζεται σε συνδυασμό υδροδυναμικής προσομοίωσης και συμμετοχικού σχεδιασμού.

Για την προσομοίωση χρησιμοποιήθηκαν τα λογισμικά MIKE URBAN και MIKE FLOOD, τα οποία επιτρέπουν την ανάπτυξη συνδυασμένων μοντέλων 1D-2D για την προσομοίωση ροής σε ποτάμια και επιφανειακής πλημμύρας. Συγκεκριμένα:

- αναπτύχθηκαν περιφερειακά (1D) και τοπικά (1D - 2D) μοντέλα,
- τα περιφερειακά μοντέλα παρείχαν οριακές συνθήκες στο τοπικό μοντέλο,
- η προσομοίωση περιλάμβανε τόσο ποτάμιες όσο και αστικές πλημμύρες.

Τα δεδομένα εισόδου περιλάμβαναν:

- τοπογραφικά δεδομένα και χρήσεις γης,
- γεωμετρία υδρογραφικού και αποχετευτικού δικτύου,
- υδρολογικά δεδομένα (παροχές, στάθμες νερού)
- ιστορικά δεδομένα πλημμύρας (ιδίως το γεγονός του 2011).

Για την αξιολόγηση των σεναρίων χρησιμοποιήθηκαν:

- συνθετικά επεισόδια βροχοπτώσεων με περιόδους επαναφοράς 2, 20 και 100 ετών,
- πραγματικό ακραίο γεγονός (πλημμύρα 2011).

Επιλογή NBS – Σενάρια αξιολόγησης

Η επιλογή των μέτρων βασίστηκε σε συνδυασμό τεχνικής ανάλυσης και συμμετοχικών διαδικασιών (ερωτηματολόγια και συνεντεύξεις με φορείς και κατοίκους), ώστε να ενσωματωθούν οι προτιμήσεις των ενδιαφερόμενων μερών.

Οι NBS διακρίνονται σε μικρής κλίμακας (urban scale) όπως είναι οι πράσινες στέγες, διαπερατά οδοστρώματα, βιοκατακράτηση, τάφροι διήθησης κ.ά. καθώς και σε μεγάλης κλίμακας (regional scale) όπως είναι δεξαμενές αποθήκευσης, υγρότοποι κανάλια εκτροπής, διεύρυνση υφιστάμενων λιμνών/ταμιευτήρων.

Διαμορφώθηκαν τρία βασικά σενάρια:

1. Συνδυασμός μικρής κλίμακας NBS και τοπικών γκρι υποδομών
2. Συνδυασμός μεγάλης κλίμακας NBS και γκρι υποδομών
3. Υβριδικός συνδυασμός μικρής και μεγάλης κλίμακας NBS με γκρι υποδομές

Δείκτες αξιολόγησης

Η αξιολόγηση βασίστηκε κυρίως σε υδρολογικούς και υδραυλικούς δείκτες που προκύπτουν από αριθμητική προσομοίωση:

- Μείωση όγκου απορροής
- Μείωση αιχμής παροχής
- Έκταση και βάθος πλημμύρας

Παράλληλα, λαμβάνονται υπόψη και ποιοτικά κριτήρια, όπως είναι οι προτιμήσεις και αποδοχή των μέτρων από τα ενδιαφερόμενα μέρη (stakeholders) καθώς και η δυνατότητα συνδυαστικών οφελών (π.χ. οικολογικά και κοινωνικοοικονομικά οφέλη)

Αποτελέσματα – Συμπεράσματα

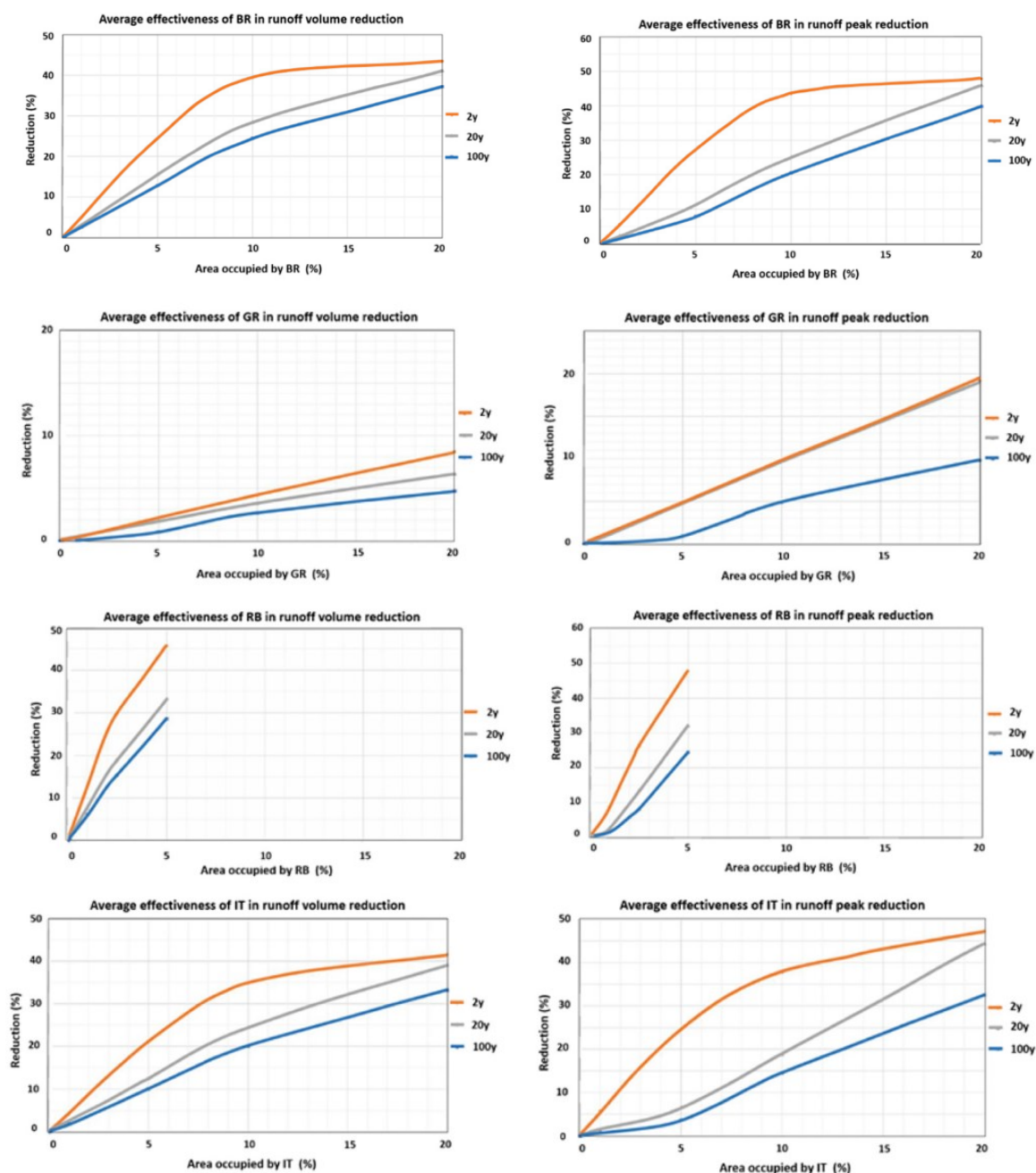
Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η αποτελεσματικότητα των NBS εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την κλίμακα εφαρμογής και την ένταση του φαινομένου. Οι μικρής κλίμακας

NBS είναι αποτελεσματικές για ήπια γεγονότα, αλλά η απόδοσή τους μειώνεται σημαντικά σε ακραίες βροχοπτώσεις (μείωση έως 67% στον όγκο και 81% στην αιχμή απορροής μεταξύ 2ετούς και 100ετούς γεγονότος). Οι μεγάλης κλίμακας NBS συμβάλλουν ουσιαστικά στη μείωση ποτάμιων πλημμυρών, μειώνοντας σημαντικά τον όγκο πλημμύρας (~22% σε ακραίο γεγονός), ωστόσο δεν επαρκούν για την αντιμετώπιση τοπικών αστικών πλημμυρών.

Ο υβριδικός συνδυασμός αναδεικνύεται ως η πιο αποτελεσματική στρατηγική, καθώς συνδυάζει τα πλεονεκτήματα όλων των λύσεων και επιτυγχάνει το υψηλότερο επίπεδο προστασίας.

Συνολικά, η μελέτη καταδεικνύει ότι καμία μεμονωμένη κατηγορία μέτρων δεν επαρκεί για την ολοκληρωμένη διαχείριση πλημμυρών και πως οι υβριδικές λύσεις (NBS + γκρι υποδομές) αποτελούν την πλέον αποδοτική προσέγγιση. Επιπλέον αποδεικνύεται πως η ενσωμάτωση των απόψεων των ενδιαφερόμενων μερών είναι κρίσιμη για την αποδοχή και εφαρμογή των μέτρων.

Η μελέτη δεν ενσωματώνει ρητά διαδικασίες διαχείρισης αβεβαιότητας, γεγονός που αποτελεί περιορισμό της μεθοδολογίας και επηρεάζει την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων, ιδιαίτερα υπό συνθήκες ακραίων γεγονότων και μεταβαλλόμενου κλίματος. Για παράδειγμα οι παράμετροι των NBS (π.χ. διήθηση, αποθήκευση) λαμβάνονται από τη βιβλιογραφία ή βασίζονται σε υποθέσεις. Ο ορισμός επομένως των δεδομένων εισαγωγής εμπεριέχουν αβεβαιότητες, ωστόσο δεν πραγματοποιείται ποσοτική αξιολόγηση της επίδρασής τους. Όσον αφορά στο υπολογιστικό προσομοίωμα, η βαθμονόμηση του μοντέλου βασίζεται σε δεδομένα από πραγματικό πλημμυρικό γεγονός (του 2011) καθώς και προηγούμενες μελέτες. Μολονότι γίνεται σύγκριση παρατηρημένων – υπολογισμένων τιμών (validation), δεν εξετάζεται η αβεβαιότητα των μετρήσεων ή των οριακών συνθηκών. Τέλος, ενώ η μελέτη χρησιμοποιεί διαφορετικά σενάρια εφαρμογής παρεμβάσεων (συνδυασμοί NBS και γκρίζες υποδομές) υποδηλώνοντας διερεύνηση εναλλακτικών λύσεων, δεν πραγματοποιείται ανάλυση αβεβαιοτήτων ούτε αξιολογείται η ευαισθησία των αποτελεσμάτων στις επιλογές σχεδιασμού.



Σχήμα 21 Αποτελεσματικότητα διαφορετικών μικρής κλίμακας NBS για διάφορες περιόδους επαναφοράς (BR: βιοκατακράτηση, GR: πράσινη στέγη, RB: δεξαμενή συλλογής όμβριων, IT: τάφος διήθησης). (Πηγή: Vojinovic et al., 2021)

4.5.3 Παρουσίαση μελέτης: Theochari & Baltas (2024)

Περιοχή μελέτης και στόχος

Η μελέτη εξετάζει την εφαρμογή NBS για τη μείωση του πλημμυρικού κινδύνου στη λεκάνη απορροής του Σαρανταπόταμου, ανάντη του οικισμού Μαγούλα στην Ελλάδα. Η περιοχή χαρακτηρίζεται από συγκεκριμένα μορφολογικά και υδρολογικά χαρακτηριστικά, τα οποία επηρεάζουν τη δημιουργία και διάδοση πλημμυρικών φαινομένων.

Βασικός στόχος της έρευνας είναι η αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας διαφορετικών NBS υπό τρέχουσες και μελλοντικές κλιματικές συνθήκες, με έμφαση στη μεταβολή των πλημμυρικών υδρογραφημάτων και ειδικότερα της αιχμής παροχής. Παράλληλα, επιδιώκεται η σύγκριση εναλλακτικών λύσεων ως προς την καταλληλότητά τους για την περιοχή μελέτης.

Μεθοδολογία

Η μεθοδολογία βασίζεται σε υδρολογική προσομοίωση μέσω του λογισμικού HEC-HMS, το οποίο χρησιμοποιείται για την προσομοίωση της μετατροπής βροχόπτωσης σε απορροή.

Η ανάπτυξη του μοντέλου στηρίχθηκε σε:

- ψηφιακό μοντέλο εδάφους (DEM) ανάλυσης 5 m x 5 m,
- δεδομένα χρήσεων γης (CORINE Land Cover 2018),
- γεωλογικά δεδομένα για τον υπολογισμό του δείκτη καμπύλης απορροής (SCS Curve Number – CN)
- καμπύλες έντασης – διάρκειας συχνότητας (IDF) για τον σχεδιασμό βροχόπτωσης.

Η προσομοίωση πραγματοποιήθηκε με:

- σχεδιαστική βροχόπτωση διάρκειας 24 ωρών και περίοδο επαναφοράς 100 ετών,
- χρήση της μεθόδου SCS-CN για τον υπολογισμό απωλειών,
- μετατροπή βροχόπτωσης – απορροής μέσω μοναδιαίου υδρογραφήματος (Unit Hydrograph)

Η κατανομή της βροχόπτωσης έγινε με τη μέθοδο Alternating Block, επιτρέποντας ρεαλιστική χρονική αναπαράσταση της καταιγίδας.

Επιλογή NBS – Σενάρια αξιολόγησης

Στη μελέτη εξετάζονται δύο βασικές κατηγορίες NBS:

- αλλαγή χρήσεων γης (land cover change)
- κατασκευή λιμνοδεξαμενών / δεξαμενών ανάσχεσης (retention ponds)

Τα σενάρια αξιολόγησης περιλαμβάνουν:

- βασικό σενάριο χωρίς NBS
- σενάρια εφαρμογής κάθε NBS ξεχωριστά
- συνδυαστική εφαρμογή των NBS

Επιπλέον, η αξιολόγηση πραγματοποιείται τόσο για τις τρέχουσες κλιματικές συνθήκες όσο και για σενάρια κλιματικής αλλαγής (κατώτερο, μέσο και ανώτερο σενάριο), ώστε να διερευνηθεί η ευαισθησία των αποτελεσμάτων σε μελλοντικές μεταβολές.

Δείκτες αξιολόγησης

Η αξιολόγηση βασίζεται κυρίως σε υδρολογικούς δείκτες που προκύπτουν από την ανάλυση των πλημμυρικών υδρογραφήματων:

- αιχμή παροχής (peak discharge),
- χρόνος αιχμής (time to peak)
- μορφή και εξέλιξη του υδρογραφήματος.

Η μείωση της αιχμής παροχής αποτελεί τον βασικό δείκτη αποτελεσματικότητας των NBS, καθώς συνδέεται άμεσα με τον περιορισμό του πλημμυρικού κινδύνου.

Αποτελέσματα – Συμπεράσματα

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι οι NBS συμβάλλουν σημαντικά στη μείωση της αιχμής παροχής, με διαφοροποιήσεις ανάλογα με τον τύπο της παρέμβασης. Έτσι η αλλαγή χρήσεων γης οδηγεί σε μείωση της αιχμής παροχής περίπου κατά 9,3 %. Οι δεξαμενές ανάσχεσης (retention ponds) παρουσιάζουν σημαντικά υψηλότερη αποτελεσματικότητα,

επιτυγχάνοντας μείωση περίπου 28 %. Σημειώνεται πως στα υδρογραφήματα πλημμύρας που παρουσιάζονται στη μελέτη και αφορούν τα σενάρια πριν και μετά την εφαρμογή των NBS φαίνεται πως τα υδρογραφήματα με εφαρμογή NBS βρίσκονται υψηλότερα από το σενάριο αναφοράς (π.χ. Σήμα 4.4). Αυτό δεν υποδηλώνει απαραίτητα την αύξηση την πλημμυρικής επικινδυνότητας λόγω των NBS, αλλά οφείλεται στον τρόπο διαμόρφωσης των σεναρίων και στις παραδοχές της μοντελοποίησης. Συγκεκριμένα, η αλλαγή χρήσεων γης, η παραμετροποίησης του μοντέλου (π.χ. αριθμός καμπύλης απορροής) και οι σχεδιαστικές υποθέσεις για τη λειτουργία των έργων επηρεάζουν καθοριστικά την παραγόμενη απορροή. Ως εκ τούτου, η σύγκριση των υδρογραφημάτων δεν αποτελεί αυστηρά ισοδύναμη αξιολόγηση της επίδρασης των NBS, γεγονός που αναδεικνύει τη σημασία της ορθής διαμόρφωσης σεναρίων και της διαχείρισης αβεβαιοτήτων.

Επιπλέον, η αλλαγή χρήσεων γης αυξάνει τον χρόνο αιχμής, συμβάλλοντας στη χρονική εξομάλυνση της πλημμύρας, ενώ οι δεξαμενές παρέχουν άμεσο έλεγχο του αποθηκευόμενου όγκου νερού.

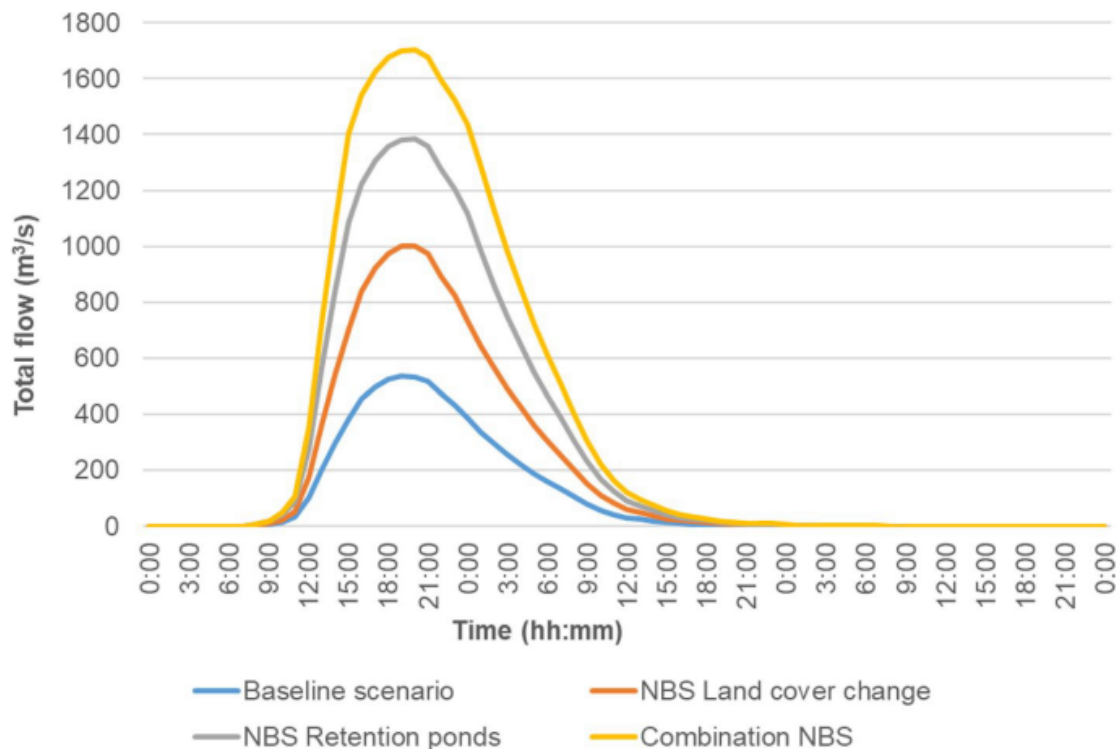
Η συνδυαστική εφαρμογή των NBS εμφανίζει τη μεγαλύτερη συνολική αποτελεσματικότητα, επιβεβαιώνοντας τη σημασία ολοκληρωμένων παρεμβάσεων.

Συνολικά, η μελέτη καταδεικνύει ότι:

- η αποτελεσματικότητα των NBS εξαρτάται από τα φυσικά χαρακτηριστικά της λεκάνης,
- η χωρική τοποθέτηση των μέτρων είναι κρίσιμη,
- οι δεξαμενές ανάσχεσης αποτελούν άμεση και ιδιαίτερα αποδοτική λύση,
- απαιτείται συνδυαστική αξιολόγηση τεχνικών και οικονομικών παραμέτρων για την επιλογή της βέλτιστης στρατηγικής.

Όσον αφορά τη διαχείριση των αβεβαιοτήτων, η μελέτη ενσωματώνει μερικώς την έννοια της αβεβαιότητας, κυρίως μέσω της χρήσης πολλαπλών σεναρίων κλιματικής αλλαγής και της αξιοποίησης διαστημάτων εμπιστοσύνης στις καμπύλες IDF. Παράλληλα, αναγνωρίζει ρητά την ύπαρξη αβεβαιοτήτων που σχετίζονται με την ακρίβεια των δεδομένων και τη δυναμική του περιβάλλοντος, προτείνοντας τη χρήση πολυκριτηριακών μεθόδων ως μελλοντική κατεύθυνση. Ωστόσο, η μελέτη δεν περιλαμβάνει συστηματική

ανάλυση αβεβαιότητας, καθώς δεν εφαρμόζονται τεχνικές ποσοτικοποίησης (π.χ. ανάλυση ευαισθησίας ή στοχαστική προσομοίωση), ενώ οι κρίσιμες παράμετροι, όπως ο αριθμός καμπύλης απορροής και οι παραδοχές σχεδιασμού των NBS, αντιμετωπίζονται ντετερμινιστικά. Συνεπώς, η διαχείριση της αβεβαιότητας παραμένει περιορισμένη και συνιστά βασικό πεδίο βελτίωσης της προτεινόμενης μεθοδολογίας.



Σχήμα 22 Υδρογραφήματα πλημμύρας πριν και μετά την εφαρμογή NBS υπό τις τρέχουσες κλιματικές συνθήκες. (Theochari & Baltas, 2024)

4.5.4 Παρουσίαση μελέτης: Sciuto et al. (2024)

Στην εργασία των Sciuto et al. (2024), επιλέχθηκε για την αξιολόγηση περιοχών πλημμυρικού κινδύνου μια μικρή λεκάνη απορροής στη Σικελία, με την ονομασία Toscana, μια μικρή αστική-περιαστική λεκάνη έκτασης περίπου 2,65 km². Η επιλογή της συγκεκριμένης λεκάνης βασίστηκε στο γεγονός ότι, τις τελευταίες δεκαετίες, έχει επανειλημμένα εκτεθεί σε βραχείας διάρκειας αλλά υψηλής έντασης καταιγίδες, όπως και το σύνολο της μητροπολιτικής περιοχής της Κατάνιας. Τα φαινόμενα αυτά έχουν οδηγήσει σε αστοχίες του υφιστάμενου αποχετευτικού συστήματος, προκαλώντας δυνητικές επιπτώσεις σε κρίσιμους αποδέκτες κινδύνου, όπως η ανθρώπινη ζωή και υγεία, το περιβάλλον, η πολιτιστική κληρονομιά, η οικονομική δραστηριότητα και οι υποδομές.

Το υψηλότερο σημείο της λεκάνης εντοπίζεται σε υψόμετρο 379 m πάνω από τη στάθμη της θάλασσας, ενώ το χαμηλότερο βρίσκεται στο επίπεδο της θάλασσας. Το μέσο υψόμετρο ανέρχεται σε 191,3 m, ενώ η μέση κλίση της λεκάνης είναι 21,23%. Το μεγαλύτερο μέρος της λεκάνης (69,5%) καλύπτεται από αγροτικές εκτάσεις. Σύμφωνα με τα δεδομένα χρήσεων γης η δεύτερη κυρίαρχη κατηγορία είναι οι αστικές περιοχές (26,8%), ενώ το υπόλοιπο τμήμα της λεκάνης καλύπτεται από φυσική βλάστηση (3,6%).

Κύριος στόχος της μελέτης είναι η ολοκληρωμένη αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας των NBS στη διαχείριση πλημμυρικού κινδύνου. Ειδικότερα, επιδιώκεται: (α) η χαρτογράφηση της πλημμυρικής επικινδυνότητας και του κινδύνου σε επίπεδο λεκάνης, (β) η ποσοτικοποίηση της μείωσης της παροχής αιχμής και της πλημμυρικής έκτασης και (γ) η αξιολόγηση της συμβολής μικρής κλίμακας NBS στη μείωση της απορροής σε αστικό περιβάλλον.

Μεθοδολογία

Η προτεινόμενη μεθοδολογία αποσκοπεί στον εντοπισμό περιοχών επικινδυνότητας και πλημμυρικού κινδύνου, όπου θα μπορούσαν να εφαρμοστούν αποτελεσματικά NBS, καθώς και στην αξιολόγηση της απομειωτικής τους επίδρασης στη λεκάνη απορροής Toscana.

Ειδικότερα, τα κύρια δεδομένα εισόδου που χρησιμοποιήθηκαν για την υδραυλική και υδρολογική προσομοίωση περιλαμβάνουν τοπογραφικά δεδομένα (Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους με ανάλυση 2 m x 2 m), δεδομένα χρήσεων γης καθώς και δεδομένα τύπων εδάφους. Ως προς τα υδρομετεωρολογικά δεδομένα, χρησιμοποιήθηκαν μακροχρόνια δεδομένα (βροχόπτωση, θερμοκρασία και σχετική υγρασία), τα οποία προέρχονται από μετεωρολογικό σταθμό της περιοχής μελέτης και καλύπτουν χρονική περίοδο περίπου δύο δεκαετιών (2002 – 2022). Η ανάλυση των δεδομένων βροχόπτωσης περιλαμβάνει τον προσδιορισμό χαρακτηριστικών υετικών επεισοδίων και την επιλογή αντιπροσωπευτικών καταιγίδων για διαφορετικές περιόδους επαναφοράς.

Η μεθοδολογία βασίζεται στη συνδυασμένη χρήση υδραυλικού και υδρολογικού μοντέλου. Συγκεκριμένα, το μοντέλο HEC-RAS χρησιμοποιείται για την προσομοίωση της ροής και την παραγωγή χαρτών πλημμυρικής επικινδυνότητας σε κλίμακα λεκάνης, λαμβάνοντας υπόψη γεωμετρικά και υδραυλικά χαρακτηριστικά των υδατορευμάτων. Παράλληλα, το μοντέλο EPA SWMM εφαρμόζεται για την προσομοίωση της αστικής απορροής, μέσω διαχωρισμού της περιοχής σε υπολεκάνες και εισαγωγής παραμέτρων όπως το ποσοστό στεγανών επιφανειών, η κλίση και οι συντελεστές διήθησης. Πιο συγκεκριμένα υπολογίζονται οι τιμές αιχμής παροχής στην έξοδο της λεκάνης απορροής, οι οποίες να είναι συγκρίσιμες με εκείνες που προκύπτουν από το HEC-RAS στο υφιστάμενο σενάριο. Τέλος, οι επιδράσεις μετριασμού των NBS (ως προς τη μείωση της αιχμής παροχής και της επιφανειακής απορροής) αξιολογούνται στις εντοπισμένες περιοχές κινδύνου, σε κλίμακα αστικού οικοδομικού τετραγώνου, μέσω του μοντέλου EPA SWMM. Επιπλέον, οι βασικές παράμετροι προσομοίωσης προέκυψαν από προηγούμενες διαδικασίες βαθμονόμησης και επαλήθευσης των δύο μοντέλων, οι οποίες υλοποιήθηκαν με διάφορες μεθοδολογικές προσεγγίσεις, βασισμένες σε διαθέσιμα παρατηρημένα δεδομένα από άλλες λεκάνες απορροής της Σικελίας με παρόμοια χαρακτηριστικά με τη λεκάνη Toscano, οι οποίες βρίσκονται επίσης στην επαρχία της Κατάνιας.

Επιλογή NBS – Σενάρια αξιολόγησης

Εξετάζονται μικρής κλίμακας NBS σε επίπεδο αστικού οικοδομικού τετραγώνου (~30.000 m²) καλύπτοντας άνω του 30 % της επιφάνειας, και πιο συγκεκριμένα οι

πράσινες στέγες (Green Roofs GR), τα διαπερατά πεζοδρόμια (Porous Pavements PP), οι κήποι βροχής (Rain Gardens RG) και οι δεξαμενές συλλογής βρόχινου νερού (Rain Barrles RB).

Για την αξιολόγηση των NBS, αναπτύσσονται διαφορετικά σενάρια προσομοίωσης, τα οποία περιλαμβάνουν:

- την υφιστάμενη κατάσταση (χωρίς παρεμβάσεις)
- το σενάριο εφαρμογής NBS σε αστικό επίπεδο
- ένα υποθετικό σενάριο πλήρους μετατροπής αδιαπέρατων επιφανειών σε διαπερατές μέσω αλλαγής του αριθμού καμπύλης απορροής (Curve Number – CN: εμπειρική παράμετρος που χρησιμοποιείται στην υδρολογία για να εκτιμηθεί πόσο νερό από μια βροχόπτωση θα απορροφηθεί από το έδαφος)

Οι προσομοιώσεις πραγματοποιούνται για περιόδους επαναφοράς 2, 10, 50 και 200 ετών, επιτρέποντας την αξιολόγηση της απόδοσης των παρεμβάσεων υπό διαφορετικές υδρολογικές συνθήκες και τη σύγκριση μεταξύ συχνών και ακραίων γεγονότων.

Δείκτες αξιολόγησης

Η αποτίμηση της αποτελεσματικότητας των NBS βασίζεται σε ένα σύνολο υδρολογικών, υδραυλικών και δεικτών κινδύνου. Οι βασικοί υδρολογικοί δείκτες περιλαμβάνουν την παροχή αιχμής και τον όγκο απορροής, οι οποίοι αποτυπώνουν τη δυναμική της απορροής σε επίπεδο λεκάνης και αστικού τετραγώνου.

Παράλληλα, χρησιμοποιούνται υδραυλικοί δείκτες, όπως το βάθος απορροής και η ταχύτητα ροής, οι οποίοι συνδυάζονται για τον υπολογισμό του δείκτη πλημμυρικής επικινδυνότητας. Επιπλέον, η αξιολόγηση επεκτείνεται σε δείκτες κινδύνου, μέσω της εκτίμησης της δυνητικής ζημιάς και της κατηγοριοποίησης του πλημμυρικού κινδύνου (R1–R4), λαμβάνοντας υπόψη την έκθεση και την ευαλωτότητα των στοιχείων που βρίσκονται εντός της λεκάνης. Η συνδυαστική χρήση των δεικτών αυτών επιτρέπει την παραγωγή χαρτών κινδύνου, οι οποίοι χρησιμοποιούνται για τον βέλτιστο χωρικό σχεδιασμό των NBS.

Αποτελέσματα – Συμπεράσματα

Τα αποτελέσματα της μελέτης καταδεικνύουν ότι η εφαρμογή NBS μπορεί να συμβάλει ουσιαστικά στη μείωση της επιφανειακής απορροής και του πλημμυρικού κινδύνου. Σε επίπεδο αστικού τετραγώνου, παρατηρείται μείωση της παροχής αιχμής έως περίπου 16% και του όγκου απορροής έως περίπου 24%, ενώ σε επίπεδο λεκάνης, στο υποθετικό σενάριο πλήρους μετατροπής των αδιαπέρατων επιφανειών, η μείωση της παροχής αιχμής φθάνει έως και το 60% και της πλημμυρικής έκτασης έως περίπου 17%.

Ωστόσο, η αποτελεσματικότητα των NBS εμφανίζει σαφή εξάρτηση από το μέγεθος του υδρολογικού γεγονότος. Συγκεκριμένα, τα μέτρα παρουσιάζουν υψηλότερη απόδοση σε συχνά και χαμηλής έντασης επεισόδια, ενώ η αποτελεσματικότητά τους μειώνεται σημαντικά σε ακραία γεγονότα, λόγω κορεσμού της αποθηκευτικής τους ικανότητας. Το εύρημα αυτό υποδεικνύει ότι τα μικρής κλίμακας NBS δεν επαρκούν ως αυτόνομη λύση για την αντιμετώπιση έντονων πλημμυρικών φαινομένων και απαιτείται ο συνδυασμός τους με μέτρα μεγαλύτερης κλίμακας ή/και συμβατικές (γκρι) υποδομές.

Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στη διαχείριση των αβεβαιοτήτων που συνοδεύουν τη μοντελοποίηση. Οι βασικές πηγές αβεβαιότητας περιλαμβάνουν την περιορισμένη διαθεσιμότητα δεδομένων για τη βαθμονόμηση και επαλήθευση των μοντέλων, την ευαισθησία των αποτελεσμάτων σε κρίσιμες παραμέτρους όπως ο αριθμός καμπύλης απορροής, καθώς και τις διαφοροποιήσεις που προκύπτουν από τη χρήση διαφορετικών μοντελοποιητικών προσεγγίσεων. Επιπλέον, η απόδοση των NBS εξαρτάται από τον σχεδιασμό και τη χωρική τους κατανομή, ενώ δεν λαμβάνονται πλήρως υπόψη οι μελλοντικές κλιματικές μεταβολές, γεγονός που ενισχύει την αβεβαιότητα των εκτιμήσεων.

Συνολικά, η μελέτη αναδεικνύει ότι οι λύσεις βασισμένες στη φύση αποτελούν ένα αποτελεσματικό και ευέλικτο εργαλείο για τη διαχείριση των όμβριων υδάτων και την ενίσχυση της αστικής ανθεκτικότητας, υπό την προϋπόθεση ότι ενσωματώνονται σε ολοκληρωμένες στρατηγικές διαχείρισης που λαμβάνουν υπόψη τις εγγενείς αβεβαιότητες των υδρολογικών συστημάτων.

Parameter	Scenario	T 2 years	T 10 years	T 50 years	T 200 years
Peak flow ($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$)	Current Scenario	1.07	1.96	2.74	3.41
	With NBS	0.82	1.65	2.37	3.00
Runoff volume (mm)	Current Scenario	33.21	59.10	81.76	100.87
	With NBS	24.97	47.31	67.00	85.36

Πίνακας 10 Τιμές αιχμής παροχής ($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$) και όγκου απορροής (mm) στην έξοδο της αστικής υπολεκάνης για κάθε περίοδο επαναφοράς (T), στο υφιστάμενο σενάριο (χωρίς NBS) και μετά την υλοποίηση των NBS, όπως προέκυψαν από την προσομοίωση με το μοντέλο EPA SWMM (Sciuto et al., 2024)

Parameter	Scenario	T 10 years	T 50 years	T 200 years
Peak flow ($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$)	Current Scenario	27.91	50.27	61.37
	CN calibration	11.19	26.72	39.53
Flood plain area (km^2)	Current Scenario	0.42	0.49	0.57
	CN calibration	0.35	0.44	0.52

CN = Curve Number.

Πίνακας 4.5 Τιμές αιχμής παροχής ($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$) και πλημμυρικής έκτασης (km^2) στην έξοδο της λεκάνης απορροής Toscana για κάθε περίοδο επαναφοράς (T), στο υφιστάμενο σενάριο (χωρίς εφαρμογή NBS) και κατόπιν μεταβολής του αριθμού καμπύλης (CN), όπως προέκυψαν από την προσομοίωση με το μοντέλο HEC-RAS ((Sciuto et al., 2024)

4.5.5 Συζήτηση βιβλιογραφίας

Η ανάλυση των επιλεγμένων μελετών καταδεικνύει ότι οι Λύσεις Βασισμένες στη Φύση αποτελούν ένα αποτελεσματικό εργαλείο για τη διαχείριση αστικών και περιαστικών πλημμυρικών φαινομένων, ωστόσο η αποδοτικότητά τους εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη χωρική κλίμακα εφαρμογής, τα χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής και τη μεθοδολογία αξιολόγησης.

Ένα βασικό κοινό στοιχείο των μελετών είναι η χρήση υδρολογικών / υδραυλικών μοντέλων για την ποσοτικοποίηση της απόδοσης των NBS. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιούνται διαφορετικά εργαλεία προσομοίωσης (SWMM, MIKE FLOOD / MIKE URBAN, HEC-HMS), γεγονός που υποδηλώνει ότι δεν υπάρχει ένα ενιαίο πρότυπο προσομοίωσης, αλλά η επιλογή εξαρτάται από την κλίμακα και τη φύση του

προβλήματος. Ειδικότερα, η μελέτη των Sciuto et al. (2024) υιοθετεί μια ολοκληρωμένη προσέγγιση συνδυάζοντας τα μοντέλα HEC-RAS και EPA SWMM, επιτρέποντας την ανάλυση τόσο σε κλίμακα λεκάνης όσο και σε κλίμακα αστικού τετραγώνου. Αντίστοιχα, η μελέτη των Vojinovic και συν. (2021) βασίζεται σε πιο σύνθετα δισδιάστατα μοντέλα (MIKE URBAN/MIKE FLOOD), επιτρέποντας λεπτομερή προσομοίωση πλημμυρικών διεργασιών σε μεγαλύτερη χωρική κλίμακα.

Η προσέγγιση των Theochari & Baltas (2024) διαφοροποιείται, καθώς συνδυάζει υδρολογική προσομοίωση με σενάρια κλιματικής αλλαγής και στατιστική επεξεργασία βροχόπτωσης (IDF καμπύλες), ενσωματώνοντας έτσι την κλιματική μεταβλητότητα. Τέλος, η μελέτη των Yang et al. (2020) εστιάζει περισσότερο στη συστημική και ολοκληρωμένη αξιολόγηση των NBS, συχνά μέσω σεναρίων αστικού σχεδιασμού και βελτιστοποίησης, αναδεικνύοντας τον ρόλο τους σε ευρύτερα πλαίσια διαχείρισης υδατικών πόρων.

Ως προς τα είδη των NBS, παρατηρείται διαφοροποίηση μεταξύ μικρής και μεγάλης κλίμακας παρεμβάσεων. Οι πρακτικές χαμηλού αντίκτυπου (π.χ. διαπερατά οδοστρώματα, δεξαμενές συλλογής όμβριων) εμφανίζονται ιδιαίτερα αποτελεσματικές σε αστικά περιβάλλοντα για τη μείωση της επιφανειακής απορροής, όπως προκύπτει από τη μελέτη των Yang et al. (2020). Αντίθετα, σε μεγαλύτερες λεκάνες απορροής, όπως στην περίπτωση της Ayutthaya και του Σαρανταποτάμου που εξετάστηκαν στις μελέτες των Vojinovic et al. (2021) και Theochari & Baltas (2024) αντίστοιχα, οι παρεμβάσεις μεγάλης κλίμακας (π.χ. δεξαμενές ανάσχεσης, υγρότοποι) παρουσιάζουν μεγαλύτερη συμβολή στη μείωση του πλημμυρικού όγκου.

Όλες οι υπό εξέταση εργασίες καταλήγουν ότι τα NBS μειώνουν την παροχή αιχμής, καθυστερούν την απορροή και συμβάλλουν στη μείωση του πλημμυρικού κινδύνου, ιδιαίτερα για γεγονότα μικρής και μέσης έντασης.

Κοινό εύρημα και στις τρεις μελέτες αποτελεί η υπεροχή των συνδυαστικών λύσεων έναντι των μεμονωμένων. Οι υβριδικές προσεγγίσεις, που συνδυάζουν διαφορετικούς τύπους NBS ή/και γκρι υποδομές, εμφανίζουν σταθερά υψηλότερη αποτελεσματικότητα. Ωστόσο, αναδεικνύεται και μία κρίσιμη διάσταση: η μέγιστη τεχνική απόδοση δεν ταυτίζεται απαραίτητα με τη βέλτιστη επιλογή. Στη μελέτη των Yang et al. (2020), για

παράδειγμα, η πλέον αποτελεσματική τεχνικά λύση, δεν είναι η πιο οικονομικά αποδοτική, γεγονός που υπογραμμίζει την ανάγκη πολυκριτηριακής αξιολόγησης.

Η χρονική κλίμακα ανάλυσης αποτελεί επίσης καθοριστικό παράγοντα. Η χρήση μακροχρόνιων προσομοιώσεων (Yang et al., 2020) οδηγεί σε πιο αξιόπιστα και σταθερά αποτελέσματα σε σύγκριση με την ανάλυση μεμονωμένων επεισοδίων. Αντίστοιχα, η αξιολόγηση υπό διαφορετικές περιόδους επαναφοράς ή σενάρια κλιματικής αλλαγής (Vojinovic et al., 2021; Theochari & Baltas, 2024) αναδεικνύει ότι η αποτελεσματικότητα των NBS μειώνεται σε ακραία φαινόμενα, ιδιαίτερα για παρεμβάσεις μικρής κλίμακας.

Στις υπό εξέταση εργασίες παρατηρούνται σημαντικές διαφορές. Πιο συγκεκριμένα οι Sciuto et al. (2024) και Vojinovic et al. (2021) εστιάζουν κυρίως στη φυσική προσομοίωση της ροής. Οι Theochari & Baltas (2024) ενσωματώνουν κλιματικά σενάρια και στατιστική αβεβαιότητα ενώ οι Yang et al. (2020) δίνουν μεγαλύτερη έμφαση σε στρατηγικό σχεδιασμό και πολυκριτηριακή αξιολόγηση. Διαφοροποίηση παρατηρείται και ως προς την κλίμακα εφαρμογής: από μικρής κλίμακας αστικά τετράγωνα (Sciuto et al., 2024) έως μεγάλης κλίμακας λεκάνες και συστήματα ποταμών (Vojinovic et al., 2021).

Επιπλέον, μια σημαντική διαφοροποίηση εντοπίζεται ως προς τη μεθοδολογική προσέγγιση. Πιο συγκεκριμένα η μελέτη των Vojinovic και συν. (2021) ενσωματώνει συμμετοχικές διαδικασίες των ενδιαφερόμενων μερών, προσθέτοντας μια κοινωνική διάσταση στην αξιολόγηση, ενώ οι υπόλοιπες επικεντρώνονται κυρίως σε τεχνικούς δείκτες. Αυτό αναδεικνύει ένα βασικό κενό στη βιβλιογραφία: την περιορισμένη ενσωμάτωση κοινωνικοοικονομικών παραμέτρων και δεικτών βιωσιμότητας στη διαδικασία αξιολόγησης των NBS.

Συνολικά, από τη συγκριτική ανάλυση προκύπτει ότι:

1. Οι NBS είναι αποτελεσματικά αλλά όχι επαρκή από μόνα τους.

Η αποτελεσματικότητα των NBS εξαρτάται από την κλίμακα εφαρμογής και τα χαρακτηριστικά της λεκάνης και μειώνεται σημαντικά σε ακραία γεγονότα, λόγω κορεσμού της αποθηκευτικής ικανότητας.

2. Η κλίμακα εφαρμογής είναι καθοριστική.

Τα μικρής κλίμακας μέτρα έχουν τοπική επίδραση, ενώ απαιτείται συνδυασμός με μεγάλης κλίμακας παρεμβάσεις για ουσιαστική μείωση του κινδύνου.

3. Ο συνδυασμός NBS και γκρίζων υποδομών είναι αναγκαίος.

Όλες οι μελέτες υπογραμμίζουν την ανάγκη υβριδικών λύσεων για αποτελεσματική διαχείριση πλημμυρών.

4. Η απόδοση εξαρτάται από το υδρολογικό καθεστώς.

Τα NBS είναι πιο αποδοτικά σε συχνά γεγονότα (χαμηλό T) και λιγότερο σε ακραία.

Εκτός από τα παραπάνω σημεία σημειώνεται επίσης πως η μακροχρόνια και σεναριακή ανάλυση είναι απαραίτητη για αξιόπιστη αξιολόγηση και πως η πολυκριτηριακή προσέγγιση (τεχνική, οικονομική, κοινωνική) είναι κρίσιμη για τη λήψη αποφάσεων.

Τα παραπάνω ευρήματα επιβεβαιώνουν ότι οι NBS δεν αποτελούν καθολική λύση, αλλά απαιτούν προσαρμογή στις τοπικές συνθήκες και ενσωμάτωση σε ολοκληρωμένα πλαίσια σχεδιασμού, προκειμένου να μεφιστοποιηθεί η αποτελεσματικότητά τους.

Όσον αφορά στη διαχείριση των αβεβαιοτήτων γίνεται αντιληπτό πως αποτελεί κρίσιμο αλλά ανεπαρκώς ανεπτυγμένο στοιχείο στις περισσότερες μελέτες. Πιο συγκεκριμένα στη μελέτη των Sciuto et al. (2024), η αβεβαιότητα εμφανίζεται κυρίως μέσω της ευαισθησίας στο αριθμό της καμπύλης απορροής και της περιορισμένης διαθεσιμότητας δεδομένων βαθμονόμησης, χωρίς όμως συστηματική ποσοτικοποίηση. Οι Vojinovic et al. (2021) δεν ενσωματώνουν ρητή ανάλυση αβεβαιότητας, παρά την πολυπλοκότητα των μοντέλων, γεγονός που περιορίζει την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων. Οι Theochari & Baltas (2024) αποτελούν εξαίρεση, καθώς εισάγουν αβεβαιότητα μέσω των πολλαπλών κλιματικών μοντέλων, διαστημάτων εμπιστοσύνης και προσεγγίσεων συνόλου μοντέλων, αν και η ανάλυση περιορίζεται κυρίως στην κλιματική εξαναγκαστική διέγερση. Η μελέτη των Yang et al. (2021) προσεγγίζει την αβεβαιότητα περισσότερο έμμεσα, μέσω των σεναρίων σχεδιασμού και της πολυκριτηριακής αξιολόγησης χωρίς όμως πλήρη στοχαστική ανάλυση. Συνεπώς, παρά τις επιμέρους διαφοροποιήσεις, η βιβλιογραφία καταδεικνύει ότι η αβεβαιότητα αναγνωρίζεται, αλλά σπάνια ποσοτικοποιείται ή ενσωματώνεται συστηματικά στη διαδικασία λήψης αποφάσεων.

Συνοψίζοντας, οι εξεταζόμενες μελέτες επιβεβαιώνουν τον σημαντικό ρόλο των NBS στη διαχείριση πλημμυρικού κινδύνου, αναδεικνύοντας παράλληλα την ανάγκη ολοκληρωμένων πολυκλιμακικών προσεγγίσεων, συνδυασμού πράσινων και γκρι υποδομών και κυρίως συστηματικής ενσωμάτωσης της αβεβαιότητας στη μοντελοποίηση.

Η τελευταία αυτή διάσταση αποτελεί κρίσιμο πεδίο μελλοντικής έρευνας, καθώς η αξιοπιστία των εκτιμήσεων εξαρτάται άμεσα από την ικανότητα ποσοτικοποίησης και διαχείρισης των αβεβαιοτήτων που χαρακτηρίζουν τα υδρολογικά και κλιματικά συστήματα.

4.5 Συζήτηση αποτελεσμάτων και αξιολόγηση αποτελεσματικότητας των NBS

Η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από την προσομοίωση των εναλλακτικών σεναρίων αποτελεί κρίσιμο στάδιο για την αποτίμηση της αποτελεσματικότητας των NBS στη διαχείριση ομβρίων υδάτων. Η ανάλυση αυτή βασίζεται στη συγκριτική εξέταση των δεικτών απόδοσης μεταξύ του βασικού σεναρίου αναφοράς και των σεναρίων εφαρμογής NBS, επιτρέποντας την εξαγωγή τεκμηριωμένων συμπερασμάτων σχετικά με τη συμβολή τους στη μείωση του πλημμυρικού κινδύνου (Fletcher et al., 2015; Raymond et al., 2017).

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων, τα οποία προκύπτουν από τη χρήση εργαλείων όπως το EPA SWMM και το HEC-RAS, αναδεικνύουν την ικανότητα των NBS να επηρεάζουν καθοριστικά βασικές υδρολογικές παραμέτρους. Ειδικότερα, παρατηρείται μείωση του συνολικού όγκου απορροής και των παροχών αιχμής, καθώς και αύξηση του χρόνου συγκέντρωσης, γεγονός που οδηγεί σε εξομάλυνση της υδρολογικής απόκρισης των αστικών λεκανών απορροής. Οι μεταβολές αυτές συνδέονται άμεσα με τις φυσικές διεργασίες που ενσωματώνουν τα NBS, όπως η διήθηση, η αποθήκευση και η εξατμισοδιαπνοή (Berndtsson, 2010; Elliott & Trowsdale, 2007).

Η αποτελεσματικότητα των NBS διαφοροποιείται ανάλογα με τον τύπο και τον συνδυασμό των παρεμβάσεων, καθώς και με τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της περιοχής εφαρμογής. Για παράδειγμα, μέτρα όπως οι πράσινες στέγες συμβάλλουν κυρίως στη μείωση του όγκου απορροής σε τοπική κλίμακα, ενώ παρεμβάσεις όπως τα βιοκράσπεδα

και οι δεξαμενές κατακράτησης μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά τη χρονική κατανομή της απορροής και την καθυστέρηση της αιχμής πλημμύρας (Fletcher et al., 2015). Επιπλέον, η συνδυασμένη εφαρμογή πολλαπλών NBS συχνά οδηγεί σε συνεργιστικά αποτελέσματα, ενισχύοντας τη συνολική τους απόδοση (Kabisch et al., 2017).

Πέραν των υδρολογικών επιδόσεων, τα NBS προσφέρουν σημαντικά περιβαλλοντικά και κοινωνικά οφέλη. Η βελτίωση της ποιότητας των ομβρίων υδάτων μέσω φυσικών διεργασιών φιλτραρίσματος, η ενίσχυση της αστικής βιοποικιλότητας και η συμβολή στη μείωση της αστικής θερμικής νησίδας αποτελούν βασικές διαστάσεις της πολυλειτουργικότητας των NBS (Eggermont και συν., 2015; Kabisch και συν., 2017). Τα χαρακτηριστικά αυτά διαφοροποιούν τις λύσεις αυτές από τις συμβατικές «γκρίζες» υποδομές, οι οποίες επικεντρώνονται κυρίως στην ταχεία απομάκρυνση των υδάτων χωρίς να παρέχουν πρόσθετα οικοσυστημικά οφέλη (Fletcher et al., 2015).

Ωστόσο, η εφαρμογή των NBS συνοδεύεται και από ορισμένες προκλήσεις και περιορισμούς. Η αποτελεσματικότητά τους μπορεί να επηρεάζεται από τη διαθεσιμότητα χώρου σε πυκνοδομημένες περιοχές, καθώς και από την ανάγκη για συστηματική συντήρηση προκειμένου να διατηρείται η λειτουργικότητά τους σε βάθος χρόνου (Raymond και συν., 2017). Επιπλέον, η απόδοσή τους ενδέχεται να παρουσιάζει μεγαλύτερη μεταβλητότητα σε σχέση με τις συμβατικές υποδομές, ιδιαίτερα υπό συνθήκες ακραίων καιρικών φαινομένων, τα οποία αναμένεται να ενταθούν λόγω της κλιματικής αλλαγής (IPCC, 2022).

Επίσης, οι ανασκοπήσεις των Esraz-UI - Zannat και συν. (2024) και Raška και συν. (2022) καταλήγουν ότι, παρά τις ενδείξεις αποτελεσματικότητας των NBS στον μετριασμό αστικών πλημμυρών, τα διαθέσιμα εμπειρικά δεδομένα παραμένουν περιορισμένα, γεγονός που δεν επιτρέπει την εξαγωγή ασφαλών επιστημονικών συμπερασμάτων. Ένα βασικό ζήτημα αποτελεί η έλλειψη επιτόπιων μελετών παρακολούθησης που συλλέγουν πρωτογενή δεδομένα για την αξιολόγηση της επίδρασης των NBS. Πέραν ορισμένων εξαιρέσεων (Horstman και συν., 2014), οι περισσότερες αξιολογήσεις βασίζονται κυρίως σε αριθμητικά υδρολογικά και υδραυλικά μοντέλα.

Σημαντικό στοιχείο της αξιολόγησης αποτελεί επομένως η εξέταση των αβεβαιοτήτων που σχετίζονται με τα δεδομένα εισόδου και τις παραμέτρους των μοντέλων. Όπως έχει αναφερθεί, οι αβεβαιότητες αυτές μπορούν να επηρεάσουν την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων και, συνεπώς, πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά την ερμηνεία τους (Beven, 2009). Η χρήση εναλλακτικών σεναρίων και η εφαρμογή αναλύσεων ευαισθησίας συμβάλλουν στην καλύτερη κατανόηση του εύρους των πιθανών αποκλίσεων.

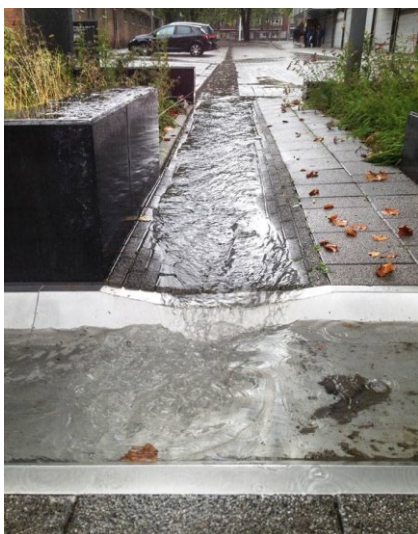
Συνολικά, η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων καταδεικνύει ότι τα NBS αποτελούν αποτελεσματική και βιώσιμη προσέγγιση για τη διαχείριση ομβρίων υδάτων, ιδιαίτερα όταν ενσωματώνονται σε ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο αστικού σχεδιασμού. Η επιτυχής εφαρμογή τους προϋποθέτει τη συνεκτίμηση υδρολογικών, περιβαλλοντικών και κοινωνικοοικονομικών παραμέτρων, καθώς και την προσαρμογή τους στις τοπικές συνθήκες (Kabisch και συν., 2017; Raymond και συν., 2017). Η ανάλυση αυτή συμβάλλει στη διαμόρφωση τεκμηριωμένων στρατηγικών και πολιτικών, που προωθούν τη μετάβαση προς πιο ανθεκτικά και βιώσιμα αστικά συστήματα διαχείρισης υδάτων.

5. Διεθνής εμπειρία και εφαρμογές NBS σε αστικά περιβάλλοντα

5.1 Σύγχρονες εφαρμογές NBS

Η διεθνής εμπειρία από την εφαρμογή NBS σε αστικά περιβάλλοντα αναδεικνύει μια σαφή μετατόπιση από τις παραδοσιακές «γκρι» υποδομές προς υβριδικές και πολυλειτουργικές παρεμβάσεις που ενσωματώνουν φυσικές διεργασίες στον αστικό σχεδιασμό. Οι εφαρμογές αυτές διαφοροποιούνται σημαντικά ως προς την κλίμακα, τους στόχους και την αποτελεσματικότητά τους, ανάλογα με τις τοπικές περιβαλλοντικές και θεσμικές συνθήκες.

Χαρακτηριστική περίπτωση αποτελεί η πόλη του Ρότερνταμ στην Ολλανδία, όπου οι NBS ενσωματώθηκαν στρατηγικά για την αντιμετώπιση του αυξημένου κινδύνου πλημμυρών. Η ανάπτυξη των λεγόμενων πλατειών με νερό (water squares), όπως η *Bentemplein*, επέτρεψε τη διπλή χρήση του δημόσιου χώρου ως περιοχής αναψυχής σε περιόδους ξηρασίας και ως προσωρινού ταμιευτήρα νερού κατά τη διάρκεια έντονων βροχοπτώσεων. Η προσέγγιση αυτή συνέβαλε στη μείωση της πίεσης στο αποχετευτικό δίκτυο και ενίσχυσε την ανθεκτικότητα της πόλης σε τοπικές πλημμύρες. Ωστόσο, η αποτελεσματικότητα των παρεμβάσεων περιορίζεται σε γεγονότα μικρής και μεσαίας έντασης, ενώ το υψηλό κόστος κατασκευής και συντήρησης παραμένει σημαντική πρόκληση (Frantzeskaki και συν., 2015).



Εικόνα 1 Πλατεία νερού Benthemplein στο Ρότερνταμ (<https://land8.com/waterplein-benthemplein-reveals-the-secret-of-versatile-water-squares/>)

Αντίστοιχα, στην Κοπενχάγη στη Δανία, η εφαρμογή του *Cloudburst Management Plan* μετά τις καταστροφικές πλημμύρες του 2011 αποτελεί ένα από τα πιο ολοκληρωμένα παραδείγματα ενσωμάτωσης NBS σε αστική κλίμακα. Το σχέδιο περιλαμβάνει τη μετατροπή αστικών οδών σε διαδρομές απορροής, τη δημιουργία πράσινων περιοχών προσωρινής αποθήκευσης νερού και τη συνδυασμένη χρήση πράσινων και γκρι υποδομών. Η επιτυχία του σχεδίου έγκειται στη συστημική του προσέγγιση και στη μακροπρόθεσμη στρατηγική του, αν και η υλοποίηση χαρακτηρίζεται από υψηλή πολυπλοκότητα και ανάγκη συντονισμού πολλών εμπλεκόμενων φορέων (Kaspersen & Halsnæs, 2017).

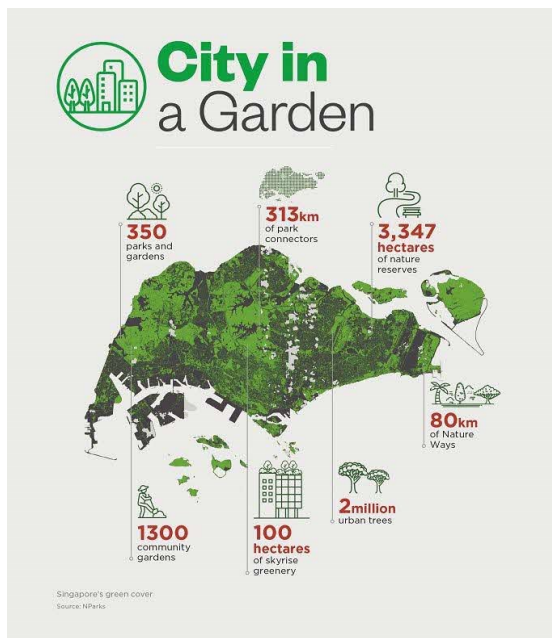


Εικόνα 2 Πάρκο στην Κοπενχάγη που έχει διαμορφωθεί έτσι ώστε να συκρατεί την περίσσεια νερού στο επίπεδο του εδάφους (<https://constructionnews.ie/copenhagen-cloudburst-plan/>)



Εικόνα 3 Σχεδιασμός οδού κατακράτησης ομβρίων στην Κοπεγχάγη (άνω εικόνα), η οποία έχει σχεδιαστεί ώστε να μετατρέπεται σε ανοιχτό υδάτινο σώμα κατά τη διάρκεια έντονων βροχοπτώσεων (κάτω εικόνα) (<https://urpl590resilience.wordpress.com/2016/04/29/building-a-resilient-copenhagen-urban-flood-mitigation-in-a-global-city/>)

Στην περίπτωση της Σιγκαπούρης, οι NBS εντάσσονται σε ένα ευρύτερο όραμα αστικής ανάπτυξης, γνωστό ως “City in a Garden”. Η ενσωμάτωση κάθετων κήπων, πράσινων προσόψεων και εκτεταμένων αστικών πάρκων έχει συμβάλει στη βελτίωση του μικροκλίματος και στη μείωση των φαινομένων αστικής θερμικής νησίδας. Παράλληλα, οι παρεμβάσεις αυτές ενισχύουν την αισθητική και την ελκυστικότητα της πόλης σε διεθνές επίπεδο. Ωστόσο, η εξάρτηση από τεχνολογικές λύσεις και το υψηλό κόστος συντήρησης περιορίζουν τη δυνατότητα μεταφοράς αυτού του μοντέλου σε άλλες πόλεις με λιγότερους πόρους (Newman et al., 2017).



Εικόνα 4 Αστικός σχεδιασμός “City in a Garden” ενσωματώνοντας NBS στη Σιγκαπούρη
(<https://knowledge.csc.gov.sg/ethos-issue-19/growing-a-biophilic-city-in-a-garden/>;
<https://talkingplants.blogspot.com/2014/02/singapore-city-in-garden-by-bay.html>)

Στις Ηνωμένες Πολιτείες, και συγκεκριμένα στη Νέα Υόρκη, η εφαρμογή του “Green Infrastructure Plan” επικεντρώνεται στη διαχείριση των όμβριων υδάτων μέσω παρεμβάσεων όπως κήποι βροχής, διαπερατά πεζοδρόμια και πράσινες στέγες. Οι λύσεις αυτές αποδείχθηκαν οικονομικά αποδοτικότερες σε σύγκριση με τις παραδοσιακές υποδομές, συμβάλλοντας στη μείωση των υπερχειλίσεων του αποχετευτικού συστήματος. Παρ’ όλα αυτά, η αποτελεσματικότητά τους εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την κλίμακα εφαρμογής, καθώς αποσπασματικές παρεμβάσεις παρουσιάζουν περιορισμένα αποτελέσματα (NYC DEP, 2010).



Εικόνα 5 Υλοποίηση εφαρμογής χαρτογράφησης ενσωματώνοντας NBS στο πλαίσιο διαδικτυακής στρατηγικής ενίσχυσης πράσινων έργων υποδομών στη Νέα Υόρκη ([https://experience.arcgis.com/experience/d826b115c87841d491c2b41fcb175305?z=5&p=1008285,245917&a=GREEN INFRA&c=GISBasic&f=BLUE ROOF,CISTERN,CONSTRUCTED WETLANDS,GREEN ROOF,PERVIOUS PAVEMENT,RAIN BARREL,RAIN GARDEN,RAINWATER REUSE SYSTEM,SWALE,TREE PIT](https://experience.arcgis.com/experience/d826b115c87841d491c2b41fcb175305?z=5&p=1008285,245917&a=GREEN%20INFRA&c=GISBasic&f=BLUE%20ROOF,CISTERN,CONSTRUCTED%20WETLANDS,GREEN%20ROOF,PERVIOUS%20PAVEMENT,RAIN%20BARREL,RAIN%20GARDEN,RAINWATER%20REUSE%20SYSTEM,SWALE,TREE%20PIT))

Τέλος, στο Βερολίνο, η εφαρμογή πράσινων στεγών και πολιτικών ενίσχυσης της αστικής βιοποικιλότητας (GründachPLUS Funding) έχει συμβάλει στη βελτίωση των μικροκλιματικών συνθηκών και στην αύξηση της οικολογικής συνδεσιμότητας εντός της πόλης. Παρά την επιτυχία των μέτρων αυτών, η ευρεία εφαρμογή τους περιορίζεται από τεχνικούς περιορισμούς σε υφιστάμενα κτίρια και από την ανάγκη παροχής οικονομικών κινήτρων για τη συμμετοχή ιδιωτών (Kabisch και συν., 2016).



Εικόνα 6 Υλοποίηση εφαρμογής χαρτογράφησης ενσωματώνοντας NBS στο πλαίσιο διαδικτυακής στρατηγικής ενίσχυσης πράσινων έργων υποδομών στη Νέα Υόρκη (<https://www.berlin.de/en/urban-gardening/7870644-9519328-green-roofs-and-roof-gardens.en.html>)

Συνολικά, η ανάλυση των παραπάνω παραδειγμάτων καταδεικνύει ότι η επιτυχία των NBS εξαρτάται από τη δυνατότητα ενσωμάτωσής τους σε ευρύτερα στρατηγικά σχέδια και από τον συνδυασμό τους με συμβατικές υποδομές. Παράλληλα, αναδεικνύεται η σημασία της κλίμακας εφαρμογής, της θεσμικής υποστήριξης και της μακροχρόνιας συντήρησης, ενώ καθίσταται σαφές ότι δεν υφίσταται μία ενιαία λύση που να μπορεί να εφαρμοστεί οριζόντια σε όλα τα αστικά περιβάλλοντα.

5.2 Διεθνή ερευνητικά προγράμματα για NBS

5.2.1 Εφαρμογές NBS σε αστικά περιβάλλοντα

Η ενίσχυση της έρευνας γύρω από τις NBS τα τελευταία χρόνια έχει υποστηριχθεί σε μεγάλο βαθμό από διεθνή και ευρωπαϊκά χρηματοδοτικά προγράμματα, κυρίως μέσω πρωτοβουλιών της European Commission στο πλαίσιο των Horizon 2020 και Horizon Europe. Τα έργα αυτά λειτουργούν ως πειραματικά πεδία εφαρμογής, αξιολόγησης και κλιμάκωσης των NBS, γεφυρώνοντας το χάσμα μεταξύ θεωρίας και πρακτικής εφαρμογής σε αστικά περιβάλλοντα.

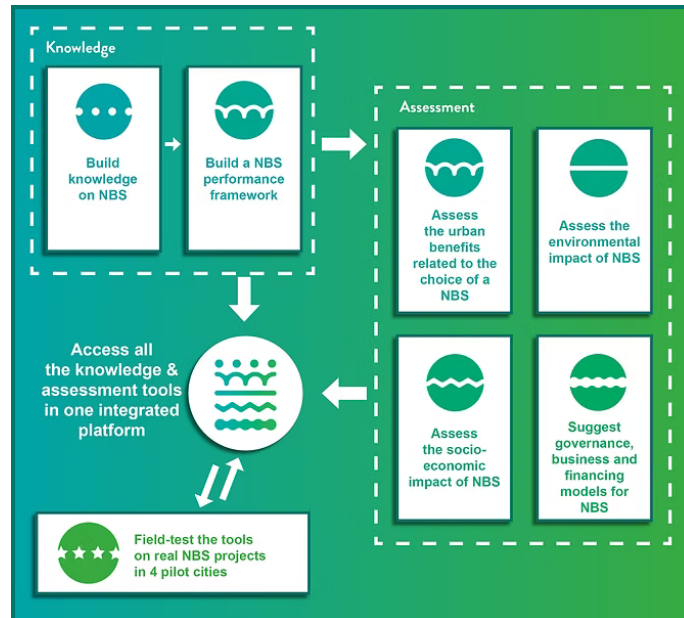
Ένα από τα πλέον αναγνωρισμένα ερευνητικά προγράμματα είναι το Connecting Nature (<https://connectingnature.oppla.eu/>), το οποίο επικεντρώθηκε στην ενσωμάτωση των NBS στον αστικό σχεδιασμό μέσω της συνεργασίας μεταξύ πόλεων, ερευνητικών φορέων και ιδιωτικού τομέα. Στο πρόγραμμα αυτό συμμετείχαν συνολικά 37 πόλεις, δύο από τις οποίες είναι ελληνικές, η πόλη των Ιωαννίνων και ο δήμος Παύλου Μελά στη Θεσσαλονίκη. Βασικός στόχος του προγράμματος ήταν η ανάπτυξη επιχειρηματικών μοντέλων που θα καθιστούν τις NBS οικονομικά βιώσιμες και ελκυστικές για επενδύσεις. Στο πλαίσιο αυτό, το έργο ανέπτυξε μεθοδολογίες συμμετοχικού σχεδιασμού (co-creation), ενισχύοντας τη συμμετοχή των πολιτών στη λήψη αποφάσεων.

Παρά τη σημαντική συμβολή του προγράμματος Connecting Nature στη θεσμική ενσωμάτωση των NBS, παρατηρείται περιορισμένη δυνατότητα μεταφοράς των αποτελεσμάτων σε μικρότερες πόλεις, καθώς και έλλειψη μακροχρόνιας αξιολόγησης της οικονομικής και περιβαλλοντικής τους απόδοσης (Frantzeskaki και συν., 2019).



Εικόνα 7 Οι 11 τομείς στους οποίους αξιοποιείται η φύση ως βασικό στοιχείο προσφοράς προϊόντων ή/και υπηρεσιών στο πλαίσιο του ερευνητικού προγράμματος Connecting Nature (<https://connectingnature.oppla.eu/groups/connecting-nature-resource-centre/nature-based-enterprises>)

Το έργο **Nature4Cities** (<https://www.nature4cities.eu/>) επικεντρώθηκε στην ανάπτυξη ψηφιακών εργαλείων υποστήριξης λήψης αποφάσεων για τον σχεδιασμό και την εφαρμογή NBS. Μέσω της ενσωμάτωσης δεδομένων που σχετίζονται με την ενεργειακή απόδοση, τη θερμική άνεση και την περιβαλλοντική ποιότητα, το έργο παρείχε ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο αξιολόγησης εναλλακτικών παρεμβάσεων. Ωστόσο, η πολυπλοκότητα των εργαλείων και η ανάγκη εξειδικευμένης γνώσης για τη χρήση τους περιόρισαν την ευρεία υιοθέτησή τους από τοπικές αρχές, αναδεικνύοντας την ανάγκη για πιο απλοποιημένες και πρακτικά εφαρμόσιμες λύσεις (Nature4Cities Consortium, 2020).



Εικόνα 8 Δραστηριότητες του ερευνητικού προγράμματος Nature4Cities
(<https://www.nature4cities.eu/the-n4c-project>)

Αντίστοιχα, το έργο **GrowGreen** (<https://networknature.eu/growgreen>) επικεντρώθηκε στην υλοποίηση πιλοτικών εφαρμογών NBS σε ευρωπαϊκές πόλεις, με στόχο την ενίσχυση της αστικής ανθεκτικότητας απέναντι στην κλιματική αλλαγή. Οι παρεμβάσεις περιλάμβαναν τη δημιουργία πράσινων υποδομών για τη διαχείριση όμβριων υδάτων και τη μείωση της αστικής θερμικής νησίδας. Το έργο κατέδειξε τη σημασία της συμμετοχής των τοπικών κοινωνιών και της ενσωμάτωσης των NBS σε υφιστάμενα πολεοδομικά σχέδια. Παρά τα θετικά αποτελέσματα, η κλιμάκωση των εφαρμογών παραμένει περιορισμένη, καθώς οι περισσότερες παρεμβάσεις υλοποιήθηκαν σε πιλοτική κλίμακα (European Commission, 2021).



Εικόνα 9 Ενσωμάτωση των NBS στον μακροπρόθεσμο αστικό σχεδιασμό, την ανάπτυξη και τη διαχείριση των πόλεων, συμβάλλοντας στη δημιουργία αρμονίας μεταξύ κοινωνίας, οικονομίας και περιβάλλοντος προς όφελος του συνόλου. (<https://networknature.eu/growgreen>)

Στο πλαίσιο των νεότερων πρωτοβουλιών του Horizon Europe, έργα όπως το **NBS4Drought** επιχειρούν να διερευνήσουν τον ρόλο των NBS στη διαχείριση υδατικών πόρων και στην αντιμετώπιση της ξηρασίας. Το έργο εστιάζει στη χρήση υγροτόπων και άλλων φυσικών συστημάτων για τη ρύθμιση του υδρολογικού κύκλου, ενσωματώνοντας παράλληλα κοινωνικές και οικονομικές παραμέτρους. Αν και τα αποτελέσματα του έργου βρίσκονται ακόμη υπό αξιολόγηση, αναμένεται να συμβάλει σημαντικά στην κατανόηση της αποτελεσματικότητας των NBS σε διαφορετικά κλιματικά και γεωγραφικά πλαίσια.



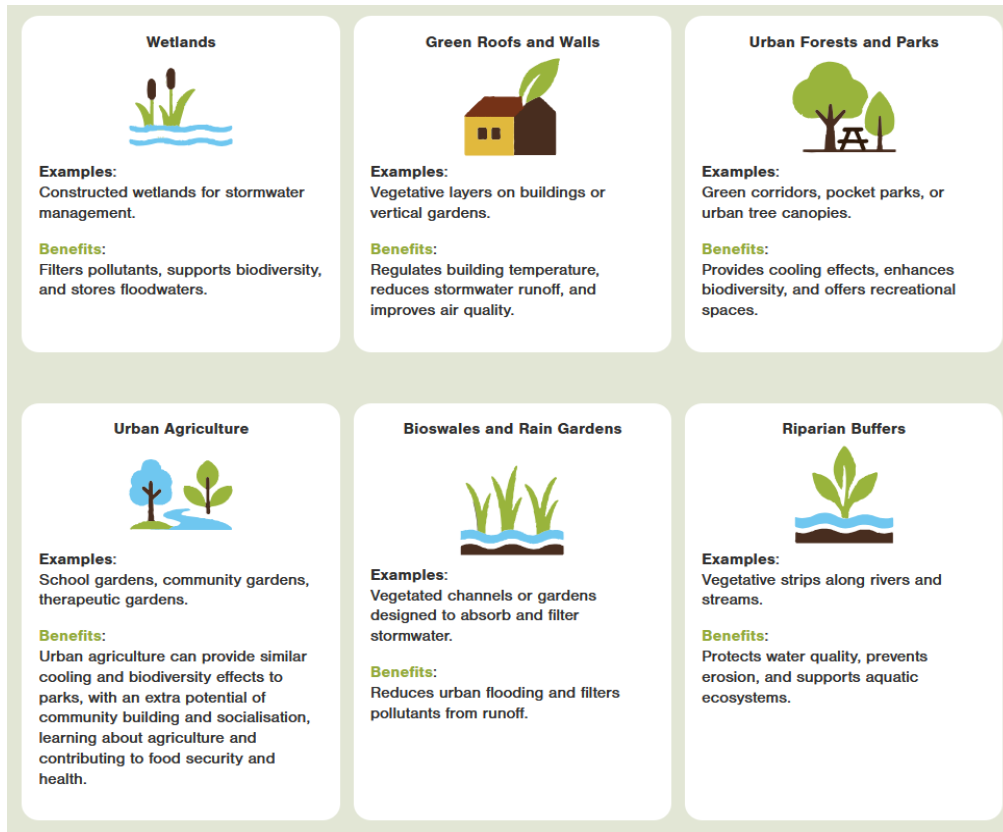
- A. Παρακολούθηση της βιοποικιλότητας μέσω καταγραφής ειδών και δειγματοληψιών
- B. Κοινωνική παρακολούθηση μέσω συνεντεύξεων και ερωτηματολογίων
- C. Αξιολόγηση των οικοσυστημικών υπηρεσιών μέσω βαθμολόγησης από ειδικούς
- D. Οικονομική παρακολούθηση με βάση δεδομένα κόστους και χρηματοοικονομικά στοιχεία.
- E. Αξιολόγηση της δέσμευσης άνθρακα μέσω δειγματοληψίας εδάφους.
- F. Υδρολογική παρακολούθηση με τη χρήση εξειδικευμένου επιτόπιου εξοπλισμού.
- G. Παρακολούθηση της ποιότητας των υδάτων μέσω επιτόπιων και εργαστηριακών αναλύσεων.

**Εικόνα 10 Διαφορετικοί τύποι δεδομένων που απαιτούνται για τις επτά πιλοτικές μελέτες στην
Ευρώπη στο πλαίσιο της διερεύνησης μετριασμού των επιπτώσεων της ξηρασίας
(<https://nbs4drought.eu/showcase/>)**

Παράλληλα, το έργο **NBSoil** επικεντρώνεται στη βελτίωση της υγείας του εδάφους μέσω της εφαρμογής NBS, δίνοντας έμφαση στη μεταφορά γνώσης και στην εκπαίδευση επαγγελματιών. Σε αντίθεση με άλλα έργα που δίνουν προτεραιότητα στην υλοποίηση παρεμβάσεων, το NBSoil αναδεικνύει τη σημασία της επιστημονικής κατάρτισης και της ανάπτυξης δεξιοτήτων. Ωστόσο, η περιορισμένη σύνδεση με μεγάλης κλίμακας εφαρμογές ενδέχεται να επηρεάσει τη δυνατότητα άμεσης αξιοποίησης των αποτελεσμάτων του σε αστικά περιβάλλοντα.



NBsoil
Nature-based Solutions
for Soil Management



Εικόνα11 Συνήθεις τύποι μπλε και πράσινων υποδομών. (<https://nbsoil.eu/knowledge-base/>)

Σημαντικό ρόλο στη διάχυση της γνώσης και στη διασύνδεση των επιμέρους έργων διαδραματίζει το δίκτυο **NetworkNature** (<https://networknature.eu/>), το οποίο λειτουργεί ως πλατφόρμα ανταλλαγής εμπειριών και καλών πρακτικών μεταξύ ερευνητών, φορέων χάραξης πολιτικής και επαγγελματιών. Μέσω της δημιουργίας κοινών βάσεων δεδομένων και εργαλείων αξιολόγησης, το δίκτυο συμβάλλει στην προώθηση της ευρύτερης υιοθέτησης των NBS σε ευρωπαϊκό και διεθνές επίπεδο.

Συνολικά, τα διεθνή ερευνητικά προγράμματα έχουν συμβάλει ουσιαστικά στην κατανόηση των πολλαπλών οφελών των NBS, τόσο σε περιβαλλοντικό όσο και σε κοινωνικοοικονομικό επίπεδο. Παράλληλα, έχουν αναδείξει τη σημασία της συμμετοχικής διακυβέρνησης, της διεπιστημονικής προσέγγισης και της ενσωμάτωσης των NBS σε στρατηγικές αστικής ανάπτυξης. Ωστόσο, παραμένουν σημαντικά ερευνητικά κενά που περιορίζουν τη μαζική εφαρμογή τους.

Ειδικότερα, η έλλειψη μακροχρόνιων δεδομένων σχετικά με την απόδοση και τη βιωσιμότητα των NBS αποτελεί κρίσιμο περιορισμό, καθώς οι περισσότερες αξιολογήσεις βασίζονται σε βραχυπρόθεσμα αποτελέσματα. Επιπλέον, η μετάβαση από πιλοτικές εφαρμογές σε παρεμβάσεις μεγάλης κλίμακας εξακολουθεί να αποτελεί πρόκληση, λόγω θεσμικών, οικονομικών και τεχνικών εμποδίων. Η ανάγκη ανάπτυξης αξιόπιστων μεθόδων οικονομικής αποτίμησης και χρηματοδότησης των NBS είναι επίσης εμφανής, καθώς η απουσία σαφών επιχειρηματικών μοντέλων περιορίζει την προσέλκυση επενδύσεων. Τέλος, ζητήματα κοινωνικής δικαιοσύνης και ισότιμης πρόσβασης σε πράσινες υποδομές αναδεικνύονται ολοένα και περισσότερο ως κρίσιμες παράμετροι για τον σχεδιασμό και την εφαρμογή των NBS.

Κατά συνέπεια, η μελλοντική έρευνα καλείται να εστιάσει στη μακροχρόνια παρακολούθηση των έργων, στην ανάπτυξη εργαλείων που θα διευκολύνουν την κλιμάκωση των παρεμβάσεων, καθώς και στη διερεύνηση της κοινωνικής διάστασης των NBS, προκειμένου να διασφαλιστεί η βιώσιμη και δίκαιη ενσωμάτωσή τους στα αστικά περιβάλλοντα.

5.2.1 Εφαρμογές NBS για τη διαχείριση ομβρίων υδάτων

Η διαχείριση όμβριων υδάτων αποτελεί έναν από τους πιο ώριμους τομείς εφαρμογής των Nature-Based Solutions (NBS), με σημαντικό αριθμό ερευνητικών έργων να επικεντρώνεται στη μείωση πλημμυρικών φαινομένων, την ενίσχυση της διήθησης και την αποκατάσταση του φυσικού υδρολογικού κύκλου σε αστικά περιβάλλοντα (Fletcher και συν., 2015; Ahiablame και συν., 2012).

Ένα από τα πιο ολοκληρωμένα έργα είναι το **SpongeWorks** (<https://www.spongeworks.eu/>), το οποίο εισάγει την έννοια της «σπογγώδους πόλης» (sponge city). Το έργο επικεντρώνεται στην ανάπτυξη και εφαρμογή λύσεων όπως πράσινες υποδομές, αστικοί υγρότοποι και διαπερατές επιφάνειες, με στόχο την αποθήκευση και καθυστέρηση της απορροής των όμβριων υδάτων. Η καινοτομία του έργου έγκειται στη συστημική προσέγγιση, καθώς εξετάζει τη διαχείριση του νερού σε επίπεδο λεκάνης απορροής και όχι μεμονωμένων παρεμβάσεων (European Commission, 2021). Παρά τα θετικά αποτελέσματα, παραμένουν ερωτήματα σχετικά με τη δυνατότητα

εφαρμογής του μοντέλου σε πόλεις με διαφορετικά κλιματικά και θεσμικά χαρακτηριστικά.

Αντίστοιχα, το έργο **UNaLab** (<https://unalab.eu/en>) επικεντρώνεται στην εφαρμογή αστικών «living labs» για την ανάπτυξη και αξιολόγηση NBS, με ιδιαίτερη έμφαση στη διαχείριση ομβρίων υδάτων. Μέσω πιλοτικών εφαρμογών σε πόλεις όπως Eindhoven και Tampere, το έργο εξετάζει τη λειτουργία λύσεων όπως κήπους βροχής, πράσινες στέγες και συστήματα βιοκατακράτησης. Η συμβολή του έγκειται στην παραγωγή εμπειρικών δεδομένων σε πραγματικές συνθήκες, ωστόσο η εφαρμογή των αποτελεσμάτων σε μεγαλύτερη κλίμακα παραμένει περιορισμένη (Kabisch και συν., 2016).

Το έργο **Blue-Green Dream** (<https://bgd.org.uk/>) εστιάζει στη βελτιστοποίηση της χωρικής τοποθέτησης μπλε-πράσινων υποδομών για τη διαχείριση πλημμυρών. Μέσω της ανάπτυξης υπολογιστικών εργαλείων, το έργο επιδιώκει να καθορίσει πού και σε ποια έκταση πρέπει να εφαρμοστούν οι NBS ώστε να επιτευχθεί μέγιστη αποτελεσματικότητα. Παρά τη σημαντική του συνεισφορά στον σχεδιασμό, η πρακτική εφαρμογή των εργαλείων αυτών απαιτεί υψηλό επίπεδο τεχνικής εξειδίκευσης (European Environment Agency, 2019).

Σημαντική είναι επίσης η συμβολή του έργου **AquaNES** (<http://www.aquan-es-h2020.eu/>), το οποίο συνδυάζει φυσικές και τεχνολογικές λύσεις για τη διαχείριση υδάτων, συμπεριλαμβανομένων των ομβρίων. Το έργο εξετάζει την ενσωμάτωση υγροτόπων και φυσικών διεργασιών σε υφιστάμενα συστήματα επεξεργασίας νερού, προωθώντας υβριδικές προσεγγίσεις (Eggermont και συν., 2015). Ωστόσο, η πολυπλοκότητα των συστημάτων αυτών αποτελεί πρόκληση για τη μαζική τους εφαρμογή.

Τέλος, το έργο **BINGO** (<https://www.projectbingo.eu/>) επικεντρώνεται στην προσαρμογή των υδατικών συστημάτων στην κλιματική αλλαγή, με έμφαση στην αντιμετώπιση ακραίων υδρολογικών φαινομένων. Αν και δεν περιορίζεται αποκλειστικά στις NBS, περιλαμβάνει σημαντικές εφαρμογές που αξιοποιούν φυσικές διεργασίες για τη διαχείριση της απορροής και τη μείωση των πλημμυρικών κινδύνων (European Commission, 2021).

Συνολικά, τα ερευνητικά αυτά έργα έχουν συμβάλει σημαντικά στην κατανόηση της λειτουργίας των NBS στη διαχείριση ομβρίων υδάτων, αναδεικνύοντας τη σημασία της

αποκεντρωμένης διαχείρισης, της πολυλειτουργικότητας και της ενσωμάτωσης των φυσικών διεργασιών στον αστικό σχεδιασμό (Fletcher και συν., 2015). Ωστόσο, εξακολουθούν να υφίστανται κρίσιμα ερευνητικά κενά. Η έλλειψη μακροχρόνιων δεδομένων απόδοσης, η περιορισμένη εφαρμογή σε μεγάλη κλίμακα και η ανάγκη για απλοποίηση των εργαλείων σχεδιασμού αποτελούν βασικές προκλήσεις. Επιπλέον, η ενσωμάτωση των NBS σε θεσμικά και πολεοδομικά πλαίσια παραμένει ζητούμενο, ιδίως σε χώρες όπου η διαχείριση υδάτων βασίζεται ακόμη κυρίως σε παραδοσιακές υποδομές.

Ερευνητικό πρόγραμμα	Στόχος	Μέθοδοι / Εργαλεία	Κύρια αποτελέσματα	Περιορισμοί
 SpongeWorks	Ανάπτυξη «σπογγώδους πόλης» για μείωση πλημμυρών	Πράσινες υποδομές, υγρότοποι, διαπερατές επιφάνειες	Βελτίωση αποθήκευσης και καθυστέρησης απορροής	Περιορισμένη δυνατότητα γενίκευσης σε διαφορετικά αστικά περιβάλλοντα
 UNaLab	Εφαρμογή και αξιολόγηση NBS σε πραγματικές συνθήκες (living labs)	Rain gardens, πράσινες στέγες, βιοκατακράτηση	Εμπειρικά δεδομένα από αστικά πειράματα	Δυσκολία κλιμάκωσης σε επίπεδο πόλης
 Blue-Green Dream	Βελτιστοποίηση χωροθέτησης μπλε-πράσινων υποδομών	Υπολογιστικά μοντέλα και decision-support εργαλεία	Βελτιωμένος σχεδιασμός και αποδοτικότητα παρεμβάσεων	Απαιτεί υψηλή τεχνική εξειδίκευση
 AquaNES	Συνδυασμός φυσικών και τεχνολογικών λύσεων διαχείρισης νερού	Υγρότοποι, υβριδικά συστήματα επεξεργασίας	Ενίσχυση απόδοσης μέσω υβριδικών προσεγγίσεων	Πολυπλοκότητα εφαρμογής
 BINGO	Προσαρμογή υδατικών συστημάτων στην κλιματική αλλαγή	Σενάρια κινδύνου, μοντέλα πλημμυρών, NBS	Βελτίωση ανθεκτικότητας σε ακραία φαινόμενα	Όχι αποκλειστική εστίαση σε NBS

Πίνακας 10 Σύνοψη σημαντικών ερευνητικών προγραμμάτων που πραγματοποιούνται τη χρήση των NBS στη διαχείριση ομβρίων υδάτων

5.3 Εφαρμογές NBS στην Ελλάδα

Η εφαρμογή των NBS στην Ελλάδα βρίσκεται σε φάση ανάπτυξης, με τις περισσότερες παρεμβάσεις να υλοποιούνται μέσω ευρωπαϊκών προγραμμάτων και πιλοτικών έργων. Σε αντίθεση με άλλες ευρωπαϊκές χώρες, όπου οι NBS έχουν ενσωματωθεί σε στρατηγικό επίπεδο στον αστικό σχεδιασμό, στην ελληνική περίπτωση οι εφαρμογές είναι κυρίως αποσπασματικές, αλλά παρουσιάζουν αυξανόμενη δυναμική, ιδιαίτερα σε τομείς όπως η αστική ανθεκτικότητα, η διαχείριση υδάτων και η προσαρμογή στην κλιματική αλλαγή.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το έργο euPOLIS (<https://eupolis-project.eu/>) στον Πειραιά, το οποίο εφαρμόζει NBS σε αστικό περιβάλλον με στόχο τη βελτίωση της δημόσιας υγείας και της ποιότητας ζωής. Οι παρεμβάσεις περιλαμβάνουν την αναβάθμιση του παραλιακού μετώπου στο Μικρολίμανο, τη δημιουργία μικρών πράσινων χώρων (pocket parks) και την αναδιαμόρφωση σχολικών αυλών με πράσινες υποδομές. Το έργο ενσωματώνει στοιχεία μπλε και πράσινης υποδομής, όπως βελτίωση της ποιότητας νερού, σκίαση και ενίσχυση της βιοποικιλότητας, λειτουργώντας ως «ζωντανό εργαστήριο» για την αξιολόγηση των NBS σε πραγματικές συνθήκες. Ωστόσο, η εφαρμογή του περιορίζεται σε συγκεκριμένες περιοχές, γεγονός που δυσχεραίνει την εξαγωγή γενικευμένων συμπερασμάτων για την πόλη στο σύνολό της.

Στην Αθήνα, ένα από τα πιο σημαντικά έργα είναι το πρόγραμμα Cooling Havens (<https://coolinghavens.eu/>), το οποίο στοχεύει στην αντιμετώπιση της αστικής θερμικής νησίδας μέσω της ενσωμάτωσης πράσινων και υδάτινων στοιχείων στον αστικό ιστό. Οι παρεμβάσεις περιλαμβάνουν κήπους συλλογής όμβριων υδάτων, βιοτάφροι αποστράγγισης, κάθετους κήπους και συστήματα επαναχρησιμοποίησης νερού, δημιουργώντας ένα δίκτυο «δροσερών σημείων» σε διαφορετικές γειτονιές της πόλης. Το έργο παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον λόγω της σύνδεσης των NBS με τη συμμετοχή των πολιτών, καθώς οι παρεμβάσεις σχεδιάζονται μέσω διαδικασιών διαβούλευσης. Παρά τα θετικά αποτελέσματα σε επίπεδο μικροκλίματος και κοινωνικής αποδοχής, η συνολική του επίδραση παραμένει τοπική, ενώ η συντήρηση των υποδομών αποτελεί κρίσιμο ζήτημα για τη μακροχρόνια βιωσιμότητα.

Στο ίδιο αστικό πλαίσιο, η πόλη της Αθήνας συμμετέχει και σε ευρύτερα προγράμματα προσαρμογής στην κλιματική αλλαγή, τα οποία περιλαμβάνουν τη φύτευση δέντρων, την

ενίσχυση της αστικής βιοποικιλότητας και τη δημιουργία πράσινων υποδομών. Οι παρεμβάσεις αυτές στοχεύουν στη μείωση της θερμοκρασίας, η οποία μπορεί να είναι σημαντικά υψηλότερη στο κέντρο της πόλης σε σχέση με τα προάστια, καθώς και στη βελτίωση της διαχείρισης των όμβριων υδάτων.

Ένα ιδιαίτερα καινοτόμο παράδειγμα εφαρμογής NBS αποτελεί το πάρκο απορρόφησης ομβρίων υδάτων (Sponge Park) στα Τρίκαλα, στο πλαίσιο του ευρωπαϊκού έργου SpongeWorks (<https://www.spongeworks.eu/>). Το έργο εισάγει την έννοια της «σπογγώδους πόλης», μέσω της χρήσης φυσικών διεργασιών για την αποθήκευση και διαχείριση του νερού. Οι παρεμβάσεις περιλαμβάνουν τεχνικές όπως φυτεύσεις παρόχθιας βλάστησης, διαμόρφωση εδάφους για συγκράτηση νερού και δημιουργία πράσινων ζωνών που μειώνουν την επιφανειακή απορροή. Το έργο αυτό διαφοροποιείται από άλλες εφαρμογές στην Ελλάδα, καθώς επιχειρεί να προσεγγίσει το ζήτημα σε μεγαλύτερη χωρική κλίμακα και με πιο συστημικό τρόπο.



Εικόνα 12 Χώρος πρασίνου στο κάτω κεντρικό τμήμα της εικόνας: η περιοχή η οποία πρόκειται να φιλοξενήσει το νέο «Sponge Park» στην πόλη των Τρικάλων (αριστερά)

Ο Δήμος Τρικκαίων προχωρά στη μετατροπή του εν λόγω δημοτικού χώρου πρασίνου, έκτασης 2 εκταρίων, στο πρώτο «Sponge Park». (δεξιά)

(<https://www.spongeworks.eu/innovative-sponge-park-in-trikala-greece-leads-the-way-for-pan-european-demonstrations-of-nature-based-solutions/>)

Παράλληλα, σημαντική δραστηριότητα παρατηρείται και σε ερευνητικό επίπεδο, με φορείς όπως το Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο να υλοποιούν πολυάριθμες εφαρμογές NBS σε διάφορες περιοχές της χώρας. Οι παρεμβάσεις αυτές περιλαμβάνουν τεχνητούς υγροτόπους, βιοτάφρους αποστράγγισης, πράσινους τοίχους και συστήματα συλλογής ομβρίων υδάτων, ενώ έχουν δημιουργηθεί και “living labs” (ζωντανό εργαστήριο βιώσιμης μετάβασης) σε νησιά όπως η Λέσβος και η Σίφνος. Η έμφαση δίνεται στη

σύνδεση της έρευνας με την τοπική εφαρμογή και στη συμμετοχή των κοινοτήτων, αν και η κλιμάκωση των λύσεων παραμένει περιορισμένη.

Τέλος, αξίζει να αναφερθεί η μεγάλη αστική ανάπλαση του Ελληνικού στην Αθήνα, η οποία περιλαμβάνει τη δημιουργία ενός εκτεταμένου μητροπολιτικού πάρκου, πράσινων υποδομών και συστημάτων διαχείρισης νερού. Αν και το έργο δεν εντάσσεται αποκλειστικά στο πλαίσιο των NBS, ενσωματώνει βασικές αρχές τους, όπως η αύξηση του αστικού πρασίνου και η αξιοποίηση φυσικών διεργασιών για τη βιώσιμη διαχείριση πόρων. Πρόκειται για μία από τις μεγαλύτερες παρεμβάσεις αστικής αναγέννησης στην Ευρώπη, με σημαντικές αναμενόμενες περιβαλλοντικές και οικονομικές επιπτώσεις.

Στην περίπτωση του πρώην στρατοπέδου του Παύλου Μελά, ο σχεδιασμός του έργου αποσκοπεί στην ένταξη του χώρου στον αστικό ιστό και στην κοινωνική ζωή της πόλης, ως υπερτοπικού χώρου πρασίνου, καθώς και ταυτόχρονα στην προστασία και ανάδειξη του ως χώρου πολιτιστικής κληρονομιάς. Ως εκ τούτου, ο στρατηγικός σχεδιασμός στοχεύει αρχικά στη δημιουργία ενός εκτεταμένου πράσινου χώρου που θα επαναφέρει τη φύση στην πόλη και θα διαφυλάξει την ταυτότητα του χώρου. Παράλληλα, μέσω της εφαρμογής Λύσεων Βασισμένων στη Φύση (Nature-Based Solutions), οι οποίες προσφέρουν βιώσιμες, οικονομικά αποδοτικές και ευέλικτες παρεμβάσεις πολλαπλών λειτουργιών, ο Δήμος Παύλου Μελά επιδιώκει την επίτευξη περιβαλλοντικών, κοινωνικών, πολιτιστικών και οικονομικών οφελών. Στόχος είναι η μετατροπή του Μητροπολιτικού Πάρκου Παύλου Μελά σε έναν αστικό πυρήνα ανοιχτής καινοτομίας. Η μετάβαση αυτή θα επιτευχθεί μέσω της αξιοποίησης του δυναμικού του πρώην στρατοπέδου ως πολύτιμου φυσικού πόρου, ιστορικού τόπου και μοχλού οικονομικής ανάπτυξης, δημιουργίας θέσεων εργασίας, κοινωνικής συνοχής και περιβαλλοντικής βιωσιμότητας. Η πρώτη φάση του έργου (Φάση Α), για την οποία έχει ήδη εξασφαλιστεί η χρηματοδότηση, επικεντρώνεται στους χώρους πρασίνου του πρώην στρατοπέδου. Αντικείμενο της φάσης αυτής αποτελεί η περιβαλλοντική αναβάθμιση του ελεύθερου χώρου, καθώς και η κατασκευή των απαραίτητων υποδομών για τη διασφάλιση της προσβασιμότητας και της ασφαλούς χρήσης του από το κοινό. Οι μεταγενέστερες φάσεις του έργου θα εστιάσουν στην αποκατάσταση και επανάχρηση των υφιστάμενων διατηρητέων κτιρίων που βρίσκονται σε κατάσταση φθοράς, δεδομένου ότι δεν

επιτρέπεται η ανέγερση νέων κτισμάτων εντός του χώρου, καθώς και στην περαιτέρω ανάπτυξη και αναβάθμιση των υπαίθριων χώρων. Οι δαπάνες για έργα πράσινων υποδομών έχουν χρηματοδοτηθεί κυρίως από εθνικούς πόρους και τα διαρθρωτικά ταμεία της Ευρωπαϊκής Ένωσης, ενώ τα αντίστοιχα λειτουργικά κόστη καλύπτονται μέσω του ετήσιου προϋπολογισμού του δήμου. Τα έργα που βασίζονται σε λύσεις βασισμένες στη φύση (NBS) τα διαχειρίζεται αποκλειστικά ο δήμος και οι αρμόδιες υπηρεσίες του. (https://connectingnature.oppla.eu/sites/default/files/uploads/D6_Appendix%20B_Pavlos%20Melas%20CN_Framework%20Report.pdf).



Εικόνα 13 Πρώην στρατόπεδο Παύλου Μελά: σημερινή κατάσταση (αριστερά)

Διαμόρφωση του Μητροπολιτικού Πάρκου Παύλου Μελά μετά την υλοποίηση της Α' φάσης (δεξιά)

https://connectingnature.oppla.eu/sites/default/files/uploads/D6_Appendix%20B_Pavlos%20Melas%20CN_Framework%20Report.pdf

Στην περίπτωση της πόλης των Ιωαννίνων, στόχος ήταν η αποκατάσταση του Πάρκου Πυρσινέλλα, ένας εγκαταλελειμμένος χώρος πρασίνου εντός των αστικών ορίων της πόλης που θεωρείται η μεγαλύτερη υφιστάμενη έκταση πρασίνου, με συνολική επιφάνεια περίπου 250.000 m². Ο χώρος περιλαμβάνει δασική βλάστηση καθώς και διάφορες κατασκευές, οι οποίες σήμερα βρίσκονται σε κατάσταση φθοράς. Ιστορικά, η περιοχή λειτουργούσε ως βασικός πυρήνας πρασίνου και αναψυχής της πόλης, προσφέροντας δυνατότητες για φυσική άσκηση (όπως τρέξιμο και τένις) και επαφή με το φυσικό περιβάλλον. Ωστόσο, κατά τα τελευταία δεκαπέντε έτη, το πάρκο εγκαταλείφθηκε πλήρως, εξαιτίας νομικής διαμάχης μεταξύ του Δήμου Ιωαννιτών και του ελληνικού Δημοσίου σχετικά με το ιδιοκτησιακό καθεστώς της έκτασης. Μετά την επίλυση των

σχετικών ζητημάτων, το Πάρκο Πυρσινέλλα συγκαταλέγεται πλέον στα έργα προτεραιότητας της δημοτικής αρχής.

Ο Δήμος Ιωαννιτών επιδιώκει να καταστήσει το πάρκο περισσότερο προσβάσιμο και να αναβιώσει τον πολιτιστικό και κοινωνικό του ρόλο, υιοθετώντας παράλληλα μια οικολογικά βιώσιμη προσέγγιση. Στο πλαίσιο αυτό, η παρέμβαση εστιάζει κυρίως στο κεντρικό τμήμα του πάρκου, ενώ ένα μικρότερο τμήμα, το οποίο αποκόπτεται από οδικό άξονα υψηλής κυκλοφορίας και χαρακτηρίζεται από πυκνή δασική βλάστηση, δεν αποτελεί άμεση προτεραιότητα.



B2. Urban green gardens



Εικόνα14 Γενικό σχέδιο ανασυγκρότησης του πάρκου Πυρσινέλλα

(https://connectingnature.oppla.eu/sites/default/files/uploads/D6_Appendix%20B_IOANNINA_Connecting%20nature%20Framework%20report_draft%20version.pdf)

Τόσο οι κεφαλαιουχικές όσο και οι λειτουργικές δαπάνες των έργων Nature-Based Solutions (NBS) στην πόλη των Ιωαννίνων μέχρι σήμερα έχουν χρηματοδοτηθεί από τις ίδιες πηγές: (α) τον περιφερειακό/δημοτικό προϋπολογισμό, (β) το Εθνικό Πρόγραμμα Δημοσίων Επενδύσεων (κρατικές επιχορηγήσεις) και (γ) συγχρηματοδοτούμενα προγράμματα της Ευρωπαϊκής Ένωσης και της εθνικής κυβέρνησης. Η διαχείριση των έργων NBS πραγματοποιείται κατά κύριο λόγο από τον Δήμο Ιωαννιτών, και ειδικότερα από την Τεχνική Υπηρεσία ή την Υπηρεσία Πρασίνου.

Παράλληλα, σε ορισμένες περιπτώσεις έχουν συναφθεί προγραμματικές συμβάσεις μεταξύ του Δήμου Ιωαννιτών και άλλων δημόσιων φορέων, όπως η Περιφέρεια Ηπείρου και το Υπουργείο Πολιτισμού, με στόχο την ενίσχυση συνεργειών για τον από κοινού σχεδιασμό και την υλοποίηση έργων. Σε περιορισμένο βαθμό έχουν εφαρμοστεί και συμπράξεις δημόσιου και ιδιωτικού τομέα (ΣΔΙΤ), δηλαδή μακροχρόνιες συμβάσεις μεταξύ ιδιωτών και του δήμου για την παροχή υπηρεσιών. Στις περιπτώσεις αυτές, ο ιδιωτικός φορέας αναλαμβάνει σημαντικό επενδυτικό ρίσκο, δεδομένου ότι η αλλαγή δημοτικής διοίκησης ανά τετραετία ενδέχεται να επηρεάσει τη συνέχεια των αποφάσεων, καθιστώντας το επενδυτικό περιβάλλον αβέβαιο, ενώ η συνολική ευθύνη διαχείρισης παραμένει στον δήμο.

Ένα από τα βασικά προβλήματα που σχετίζονται με τη χρηματοδότηση και τα επιχειρηματικά μοντέλα των έργων NBS είναι η πολυπλοκότητα της ελληνικής γραφειοκρατίας, η οποία χαρακτηρίζεται από την ύπαρξη πολλαπλών και συχνά αντικρουόμενων νομοθετικών ρυθμίσεων, καθώς και από την εμπλοκή πολυάριθμων υπηρεσιών, φορέων και υπουργείων στη διαδικασία λήψης αποφάσεων. Σε επίπεδο διακυβέρνησης, σημαντική πρόκληση αποτελεί επίσης ο συντονισμός και η συνεργασία μεταξύ διαφορετικών δημόσιων φορέων, με βασικά εμπόδια την έλλειψη σχετικής εμπειρίας και την περιορισμένη κουλτούρα συνεργατικών διαδικασιών, γεγονός που συχνά οδηγεί σε ζητήματα δυσπιστίας μεταξύ των εμπλεκόμενων μερών.

Ειδικά για το Πάρκο Πυρσινέλλα, ο Δήμος Ιωαννιτών έχει εξασφαλίσει χρηματοδότηση ύψους 10 εκατομμυρίων ευρώ μέσω του Εθνικού Ταμείου Ανάκαμψης, γεγονός που αναμένεται να επιταχύνει την υλοποίηση του έργου και την ανάδειξή του ως βασικού πυρήνα αστικού πρασίνου και βιώσιμης ανάπτυξης.

Συνολικά, η εφαρμογή των NBS στην Ελλάδα παρουσιάζει σημαντική πρόοδο, κυρίως μέσω πιλοτικών έργων και ευρωπαϊκών πρωτοβουλιών. Τα έργα αυτά έχουν συμβάλει στην ανάδειξη των δυνατοτήτων των NBS για την αντιμετώπιση κρίσιμων αστικών προκλήσεων, όπως η κλιματική αλλαγή, η θερμική νησίδα και η διαχείριση υδάτων. Ωστόσο, παραμένουν σημαντικοί περιορισμοί, όπως η αποσπασματικότητα των παρεμβάσεων, η έλλειψη εθνικής στρατηγικής και η περιορισμένη κλίμακα εφαρμογής. Η μετάβαση από πιλοτικά έργα σε συστηματική ενσωμάτωση των NBS στον αστικό σχεδιασμό αποτελεί βασική πρόκληση για το μέλλον.

6. Συμπεράσματα

Η παρούσα διπλωματική εργασία επικεντρώθηκε στη διερεύνηση και αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας των Λύσεων Βασισμένων στη Φύση (Nature-Based Solutions – NBS) στη διαχείριση ομβρίων υδάτων σε αστικά περιβάλλοντα. Μέσα από τη θεωρητική ανάλυση, τη μεθοδολογική προσέγγιση και την εξέταση παραδειγμάτων εφαρμογής, προέκυψαν σημαντικά συμπεράσματα που αναδεικνύουν τον ρόλο των NBS στο σύγχρονο αστικό σχεδιασμό.

Καταρχάς, επιβεβαιώνεται ότι οι NBS αποτελούν μια αποτελεσματική και βιώσιμη προσέγγιση για τη μείωση του πλημμυρικού κινδύνου. Η ικανότητά τους να μειώνουν την αιχμή της απορροής, να περιορίζουν τον συνολικό όγκο των απορροών και να αυξάνουν τον χρόνο συγκέντρωσης συμβάλλει ουσιαστικά στην αποφόρτιση των υφιστάμενων αποχετευτικών συστημάτων και στη μείωση της έντασης των πλημμυρικών φαινομένων.

Παράλληλα, αναδείχθηκε ότι οι Λύσεις Βασισμένες στη Φύση δεν περιορίζονται μόνο στη διαχείριση της ποσότητας των ομβρίων υδάτων, αλλά διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο και στη βελτίωση της ποιότητάς τους. Μέσω φυσικών διεργασιών, όπως η διήθηση, η κατακράτηση και η βιολογική επεξεργασία, επιτυγχάνεται μείωση των ρύπων και των αιωρούμενων στερεών, γεγονός που ενισχύει τη συνολική περιβαλλοντική τους αξία.

Ένα ακόμη κρίσιμο συμπέρασμα αφορά τον πολυλειτουργικό χαρακτήρα των NBS. Σε αντίθεση με τις συμβατικές «γκρίζες» υποδομές, οι λύσεις αυτές προσφέρουν ταυτόχρονα περιβαλλοντικά, κοινωνικά και αισθητικά οφέλη, όπως η ενίσχυση της αστικής βιοποικιλότητας, η βελτίωση του μικροκλίματος και η αναβάθμιση της ποιότητας ζωής των κατοίκων. Η συμβολή τους στην ενίσχυση της ανθεκτικότητας των πόλεων καθίσταται ιδιαίτερα σημαντική υπό το πρίσμα της κλιματικής αλλαγής.

Ωστόσο, η έρευνα ανέδειξε ότι η μέγιστη αποτελεσματικότητα των NBS επιτυγχάνεται όταν αυτές εφαρμόζονται συνδυαστικά με συμβατικές υποδομές, στο πλαίσιο μιας ολοκληρωμένης και υβριδικής προσέγγισης διαχείρισης ομβρίων υδάτων. Η ενσωμάτωσή τους στον αστικό ιστό απαιτεί συστηματικό σχεδιασμό, κατάλληλη επιλογή λύσεων και προσαρμογή στα τοπικά χαρακτηριστικά κάθε περιοχής.

Τέλος, προκύπτει ότι η ευρύτερη υιοθέτηση των NBS προϋποθέτει την ενίσχυση της επιστημονικής τεκμηρίωσης, την ανάπτυξη εργαλείων αξιολόγησης και τη διαμόρφωση κατάλληλων πολιτικών και θεσμικών πλαισίων. Συνολικά, οι Λύσεις Βασισμένες στη Φύση αποτελούν μια πολλά υποσχόμενη κατεύθυνση για τη βιώσιμη διαχείριση των ομβρίων υδάτων και την προσαρμογή των πόλεων στις σύγχρονες περιβαλλοντικές προκλήσεις.

6.1 Περιορισμοί και μελλοντική έρευνα

Παρά τη συστηματική προσέγγιση που ακολουθήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία, υπάρχουν ορισμένοι περιορισμοί οι οποίοι θα πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά την ερμηνεία των αποτελεσμάτων.

Αρχικά, η μελέτη βασίζεται σε μεγάλο βαθμό σε βιβλιογραφικά δεδομένα και δευτερογενείς πηγές, γεγονός που ενδέχεται να περιορίζει τη δυνατότητα γενίκευσης των συμπερασμάτων σε όλες τις αστικές συνθήκες. Οι διαφοροποιήσεις που παρατηρούνται μεταξύ διαφορετικών γεωγραφικών, κλιματικών και πολεοδομικών πλαισίων επηρεάζουν σημαντικά την απόδοση των NBS.

Επιπλέον, η αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας των Λύσεων Βασισμένων στη Φύση συνδέεται με αβεβαιότητες που αφορούν τόσο την ποιότητα και διαθεσιμότητα των δεδομένων όσο και τις παραδοχές των υδρολογικών και υδραυλικών μοντέλων. Οι παράγοντες αυτοί μπορεί να επηρεάσουν την ακρίβεια των εκτιμήσεων και την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων.

Ένας ακόμη σημαντικός περιορισμός σχετίζεται με τον χρονικό ορίζοντα της ανάλυσης. Πολλές από τις ωφέλειες των NBS, ιδίως οι περιβαλλοντικές και κοινωνικές, εκδηλώνονται σε μακροχρόνιο επίπεδο και είναι δύσκολο να ποσοτικοποιηθούν πλήρως σε βραχυπρόθεσμες μελέτες.

Παράλληλα, ζητήματα που αφορούν το κόστος κατασκευής, τη συντήρηση και τη λειτουργική απόδοση των NBS δεν εξετάστηκαν σε βάθος με ποσοτικά οικονομικά εργαλεία, γεγονός που περιορίζει την πλήρη αποτίμηση της οικονομικής τους βιωσιμότητας.

Με βάση τα παραπάνω, προτείνονται οι ακόλουθες κατευθύνσεις για μελλοντική έρευνα:

- Η ανάπτυξη εμπειρικών μελετών και εφαρμογών σε πραγματικές αστικές περιοχές, με στόχο την επιβεβαίωση των θεωρητικών ευρημάτων.
- Η ενσωμάτωση προηγμένων υδρολογικών και υδραυλικών μοντέλων, με στόχο τη μείωση των αβεβαιοτήτων και τη βελτίωση της ακρίβειας των προσομοιώσεων.
- Η διερεύνηση της μακροχρόνιας απόδοσης των NBS, λαμβάνοντας υπόψη τις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής.
- Η ανάπτυξη ολοκληρωμένων μεθόδων οικονομικής αξιολόγησης (cost-benefit analysis), που να περιλαμβάνουν τόσο άμεσα όσο και έμμεσα οφέλη.
- Η διερεύνηση κοινωνικών παραμέτρων, όπως η αποδοχή των πολιτών και η συμμετοχή των τοπικών κοινοτήτων στην εφαρμογή των NBS.
- Η εξέταση πολιτικών και θεσμικών εργαλείων που θα διευκολύνουν την ενσωμάτωση των NBS στον αστικό σχεδιασμό.

Συνολικά, η περαιτέρω έρευνα στον τομέα των Λύσεων Βασισμένων στη Φύση κρίνεται απαραίτητη για την ενίσχυση της επιστημονικής γνώσης και την υποστήριξη της μετάβασης προς πιο βιώσιμα και ανθεκτικά αστικά συστήματα.

6.2 Χρησιμότητα της έρευνας και πρακτικές εφαρμογές

Η παρούσα διπλωματική εργασία δεν περιορίζεται στη θεωρητική προσέγγιση των Λύσεων Βασισμένων στη Φύση (Nature-Based Solutions – NBS), αλλά συμβάλλει ουσιαστικά τόσο στην επιστημονική γνώση όσο και στην πρακτική εφαρμογή τους στον σχεδιασμό και τη διαχείριση αστικών υδάτων.

Σε επίπεδο πρακτικής αξιοποίησης, η εργασία παρέχει ένα ολοκληρωμένο μεθοδολογικό πλαίσιο για την αξιολόγηση και επιλογή κατάλληλων NBS σε αστικά περιβάλλοντα. Το πλαίσιο αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί από μηχανικούς, πολεοδόμους και φορείς διαχείρισης για τον σχεδιασμό παρεμβάσεων που στοχεύουν στη μείωση του πλημμυρικού κινδύνου. Ιδιαίτερα, η ανάλυση των υδρολογικών παραμέτρων και των δεικτών αξιολόγησης μπορεί να αποτελέσει χρήσιμο εργαλείο στη διαδικασία λήψης αποφάσεων, επιτρέποντας τη σύγκριση εναλλακτικών λύσεων και την επιλογή των βέλτιστων παρεμβάσεων.

Παράλληλα, η εργασία αναδεικνύει τη σημασία της ενσωμάτωσης των NBS στον αστικό σχεδιασμό ως μέρος μιας ολοκληρωμένης στρατηγικής διαχείρισης ομβρίων υδάτων. Η προσέγγιση αυτή μπορεί να αξιοποιηθεί από δημόσιους φορείς και οργανισμούς τοπικής αυτοδιοίκησης για την ανάπτυξη σχεδίων βιώσιμης αστικής ανάπτυξης, συμβάλλοντας στη δημιουργία πιο ανθεκτικών πόλεων απέναντι στις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής.

Σε επίπεδο πολιτικής και σχεδιασμού, τα ευρήματα της μελέτης μπορούν να υποστηρίξουν τη διαμόρφωση κανονιστικών πλαισίων και κατευθυντήριων γραμμών για την προώθηση των NBS. Η τεκμηρίωση των πολλαπλών ωφελειών τους – υδρολογικών, περιβαλλοντικών και κοινωνικών – ενισχύει την ανάγκη ένταξής τους σε εθνικές και τοπικές στρατηγικές διαχείρισης υδάτων και αστικού χώρου.

Όσον αφορά τη συμβολή στην επιστημονική έρευνα, η εργασία συγκεντρώνει και συνθέτει τη σύγχρονη διεθνή βιβλιογραφία, παρέχοντας μια συστηματική και πολυδιάστατη προσέγγιση της αποτελεσματικότητας των NBS. Επιπλέον, η ανάπτυξη ενός πλαισίου αξιολόγησης που συνδυάζει υδρολογικά, περιβαλλοντικά και λειτουργικά κριτήρια συμβάλλει στην περαιτέρω εμβάθυνση της έρευνας στον συγκεκριμένο τομέα.

Τέλος, η εργασία συμβάλλει στη γεφύρωση του χάσματος μεταξύ θεωρίας και πράξης, αναδεικνύοντας τον τρόπο με τον οποίο οι Λύσεις Βασισμένες στη Φύση μπορούν να εφαρμοστούν σε πραγματικές συνθήκες. Η σύνδεση αυτή είναι ιδιαίτερα κρίσιμη, καθώς η αποτελεσματική αντιμετώπιση των σύγχρονων περιβαλλοντικών προκλήσεων απαιτεί όχι μόνο επιστημονική γνώση, αλλά και την πρακτική αξιοποίησή της στον σχεδιασμό και την υλοποίηση έργων.

Βιβλιογραφία

- Agarwal, D. S., Bharat, A., Kjeldsen, T. R., & Adeyeye, K. (2024). Assessing impact of nature based solutions on peak flow using HEC-HMS. *Water Resources Management*, 38(3), 1125-1140.
- Ahiablame L., Shakya R. (2016). Modeling flood reduction effects of low impact development at a watershed scale, *Journal of Environmental Managing* 171, pp. 81–91, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.01.036>.
- Ahiablame, L. M., Engel, B. A., & Chaubey, I. (2012). Effectiveness of low impact development practices. *Journal of Environmental Management*.
- Ahiablame, L. M., Engel, B. A., & Chaubey, I. (2012). Representation and evaluation of low impact development practices with L-THIA-LID: An example for site planning. *Environment and Pollution*, 1(2), 1.
- Ahmad, S. K., Hossain, F., Pavelsky, T., Parkins, G. M., Yelton, S., Rodgers, M., ... & Biswas, R. K. (2020). Understanding volumetric water storage in monsoonal wetlands of Northeastern Bangladesh. *Water Resources Research*, 56(12), e2020WR027989.
- Alemaw, B. F., Chaoka, T. R., & Tafesse, N. T. (2020). Modelling of nature-based solutions (NBS) for urban water management—Investment and outscaling implications at basin and regional levels.
- Altieri, M. A. (1989). Agroecology: A new research and development paradigm for world agriculture. *Agriculture, Ecosystems & Environment*.
- Alves, A., Gersonius, B., Sanchez, A., Vojinovic, Z., & Kapelan, Z. (2018). Multi-criteria approach for selection of green and grey infrastructure to reduce flood risk and increase CO-benefits. *Water Resources Management*, 32(7), 2505-2522.
- Anderson, V., & Gough, W. A. (2022). A typology of nature-based solutions for sustainable development: an analysis of form, function, nomenclature, and associated applications. *Land*, 11(7), 1072.
- Assessment, M. E. (2005). Ecosystems and human well-being: wetlands and water. World resources institute.
- Atkins, E. (2018). Dams, political framing and sustainability as an empty signifier: The case of Belo Monte. *Area*, 50(2), 232-239.
- Bach, P. M., Kuller, M., McCarthy, D. T., & Deletic, A. (2020). A spatial planning-support system for generating decentralised urban stormwater management schemes. *Science of The Total Environment*, 726, 138282.

- Badjana, H. M., Cloke, H. L., Verhoef, A., Julich, S., Camargos, C., Collins, S., ... & Clark, J. (2023). Can hydrological models assess the impact of natural flood management in groundwater - dominated catchments?. *Journal of Flood Risk Management*, 16(3), e12912.
- Baek S.-S., Choi D.-H., Jung J.-W., Lee H.-J., Lee H., Yoon K.-S., Cho K.H. (2015) Optimizing low impact development (LID) for stormwater runoff treatment in urban area, Korea: experimental and modeling approach, *Water Research* 86, pp. 122–131, <https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.08.038>.
- Bathurst, J. C., Hagon, H., Hambly Barton, F., Iroumé, A., Kilbride, A., & Kilsby, C. (2022). Partial afforestation has uncertain effect on flood frequency and peak discharge at large catchment scales (100–1000 km²), south - central Chile. *Hydrological Processes*, 36(5), e14585.
- Behrens A., Georgiev A., Carraro M. (2010). Future Impacts of Climate Change across Europe. CEPS Working Document No. 324.
- Behroozi, A., Niksokhan, M. H., & Nazariha, M. (2018). Developing a simulation - optimisation model for quantitative and qualitative control of urban run - off using best management practices. *Journal of Flood Risk Management*, 11, S340-S351.
- Benedict, M. A., & McMahon, E. T. (2006). *Green infrastructure: Linking landscapes and communities*. Island Press.
- Berndtsson, J. C. (2010). Green roof performance towards management of runoff water quantity and quality: A review. *Ecological engineering*, 36(4), 351-360.
- between science, policy and practice (pp. 29–49). (1st ed.). Springer International
- Beven, K. (2009). *Environmental modelling: An uncertain future?* Routledge.
- Bezak, N., et al. (2021). Exploring options for flood risk management with special focus on retention reservoirs. *Sustainability*, 13(18), Article 10099. <https://doi.org/10.3390/su131810099>
- Borden K.A., Schmidtlein M.C., Emrich C.T., Piegorsch W.W., Cutter S.L. (2007). Vulnerability of US cities to environmental hazards. *Journal of Homeland Security and Emergency Management* 4: 3.
- Borst, R. (2023). *Evaluating the effect of nature-based solutions on urban runoff using hydraulic modelling: a case study in Sekondi-Takoradi, Ghana* (Doctoral dissertation, Dissertation, University of Twente. <https://essay.utwente.nl/96387>).

- Brody S.; Blessing R.; Sebastian A.; Bedient P. (2014). Examining the impact of land use/land cover characteristics on flood losses. *Journal of Environmental Planning and Management* 57, pp. 1252–1265.
- Campana N., Tucci, C. (2001). Predicting floods from urban development scenarios: Case study of the Dilúvio basin, Porto Alegre, Brazil, March.
- Cansian, A. R., Guzmán, D. A., Rosa, A., & de Toledo Machado, J. (2025). Nature-Based Solutions for Urban Drainage: A Systematic Review of Sizing and Monitoring Methods. *Water*, 17(17), 2524. <https://doi.org/10.3390/w17172524>
- Castellar, J. A. C., et al. (2021). Nature-based solutions in the urban context: Terminology, classification and scoring for urban challenges. *Ecological Indicators*, 121, 107–122.
- Chen, P. Y., Tung, C. P., & Li, Y. H. (2017). Low impact development planning and adaptation decision-making under climate change for a community against pluvial flooding. *Water*, 9(10), 756.
- Cheng, C., Yang, Y. E., Ryan, R., Yu, Q., & Brabec, E. (2017). Assessing climate change-induced flooding mitigation for adaptation in Boston's Charles River watershed, USA. *Landscape and Urban Planning*, 167, 25–36.
- Chief Scientist (2011). Understanding floods: Questions and answers. *Australian Journal of Emergency Management* 26.
- Chou, R. J. (2016). Achieving successful river restoration in dense urban areas: Lessons from Taiwan. *Sustainability*, 8(11), 1159.
- Chow V. T., Maidment D. R., Mays L. W. (1988). *Applied Hydrology*. McGraw-Hill.
- Chow, J. F., Savić, D., Fortune, D., Kapelan, Z., & Mebrate, N. (2014). Using a systematic, multi-criteria decision support framework to evaluate sustainable drainage designs. *Procedia Engineering*, 70, 343–352.
- Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1988). *Applied hydrology*. New York, NY: McGraw-Hill.
- Cipolla, S. S., Maglionico, M., & Stojkov, I. (2016). A long-term hydrological modelling of an extensive green roof by means of SWMM. *Ecological engineering*, 95, 876–887.
- Cohen-Shacham E., Walters G., Janzen C., Maginnis S. (2016). Nature-based Solutions to address global societal challenges. IUCN.
- Cohen-Shacham, E., Walters, G., Janzen, C., & Maginnis, S. (2016). *Nature-based solutions to address global societal challenges*. IUCN.
- Convention on Biological Diversity (CBD). (2009). Connecting biodiversity and climate change mitigation and adaptation: Report of the second ad hoc technical expert group on biodiversity and climate change. Montreal.

- Copernicus Climate Change Service (C3S). (2024). European State of the Climate 2024: Extreme events, floods and temperatures. Copernicus Climate Change Service.
- Cutter S.L., Boruff B.J., Shirley W.L. (2003). Social vulnerability to environmental hazards. *Social Science Quarterly* 84: 242–261.
- De Risi, R., De Paola, F., Turpie, J., & Kroeger, T. (2018). Life Cycle Cost and Return on Investment as complementary decision variables for urban flood risk management in developing countries. *International journal of disaster risk reduction*, 28, 88-106.
- Deemer, B. R., Harrison, J. A., Li, S., Beaulieu, J. J., DelSontro, T., Barros, N., ... & Vonk, J. A. (2016). Greenhouse gas emissions from reservoir water surfaces: a new global synthesis. *BioScience*, 66(11), 949-964.
- Dewan A.M., Yamaguchi Y., Rahman Z. (2012). Dynamics of land use/cover changes and the analysis of landscape fragmentation in Dhaka Metropolitan, Bangladesh. *GeoJournal* 77, pp. 315–330.
- Dietz M.E. (2007). Low impact development practices: a review of current research and recommendations for future directions, *Water, Air & Soil Pollution* 186, pp. 351–363, <https://doi.org/10.1007/s11270-007-9484-z>.
- Digman, C. J., Horton, B., Ashley, R. M., & Gill, E. (2017): BeST (Benefits of SuDS Tool) W045d BeST – User Manual, 3rd Edn., ciria, London, UK.
- Dittrich, R., Ball, T., Wreford, A., Moran, D., & Spray, C. J. (2019). A cost - benefit analysis of afforestation as a climate change adaptation measure to reduce flood risk. *Journal of Flood Risk Management*, 12(4), e12482.
- Dong X., Guo H., Zeng S. (2017). Enhancing future resilience in urban drainage system: green versus grey infrastructure, *Water Research* 124, pp. 280–289, <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.07.038>.
- Dorst H., Van der Jagt A., Raven R., Runhaar H. (2019). Urban greening through nature-based solutions – Key characteristics of an emerging concept. *Sustainable Cities and Society* 49: 101620
- Duan, H. F., Li, F., & Yan, H. (2016). Multi-objective optimal design of detention tanks in the urban stormwater drainage system: LID implementation and analysis. *Water Resources Management*, 30(13), 4635-4648.
- Dunn, R. M., Hawkins, J. M., Blackwell, M. S., Zhang, Y., & Collins, A. L. (2022). Impacts of different vegetation in riparian buffer strips on runoff and sediment loss. *Hydrological Processes*, 36(11), e14733.

- Dysarz, T., Marcinkowski, P., Wicher-Dysarz, J., Piniewski, M., Mirosław-Świątek, D., & Kundzewicz, Z. W. (2025). Assessment of climate change impact on flood hazard zones. *Water Resources Management*, 39(2), 963-977.
- Eckart, K., McPhee, Z., & Bolisetti, T. (2017). Performance and implementation of low impact development – A review. *Science of The Total Environment*, 607-608. 413-432 doi:10.1016/j.scitotenv.2017.06.254
- EEA (2012). Urban Adaptation to Climate Change in Europe: Cities' Challenges, Opportunities, and Supportive Natural and European Policies. Final draft for EIONET consultation, 1 February. European Environment Agency (EEA), Copenhagen, p. 170.
- EEA (European Environment Agency). (2023). Floods in Europe: Impacts, trends and adaptation. Copenhagen: EEA.
- Eggermont H. et al. (2015). Nature-based solutions: New influence for environmental management. *Science of the Total Environment*.
- Eggermont, H., Balian, E., Azevedo, J. M. N., et al. (2015). Nature-based solutions: New influence for environmental management and research. *GAIA*, 24(4), 243–248.
- Eggermont, H., et al. (2015). Nature-based solutions: New influence for environmental management and research in Europe. *GAIA*, 24(4), 243–248.
- Elliott, A. H., & Trowsdale, S. A. (2007). A review of models for low impact urban stormwater drainage. *Environmental Modelling & Software*, 22(3), 394–405.
- Espinal-Giron, A., Benegas Negri, L., Brenes, C., Birkel, C., & Prins, C. (2023). Assessing potential effects of nature-based solutions (NBS) on water ecosystem service in the interurban Micro-Watershed Río Torres, Costa Rica. *Forests*, 14(5), 937.
- Esraz - Ul - Zannat, M., Dedekorkut - Howes, A., & Morgan, E. A. (2024). A review of nature - based infrastructures and their effectiveness for urban flood risk mitigation. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 15(5), e889.
- Estrella, M., Renaud, F. G., & Sudmeier-Rieux, K. (2013). Opportunities, challenges and future perspectives for ecosystem-based disaster risk reduction. *The Role of Ecosystems in Disaster Risk Reduction*, edited by: Renaud, FG, Sudmeier-Rieux, K., and Estrella, M., United Nations University Press, Tokyo, Newyork, Paris, 437-456.
- European Commission (2015). Towards an EU Research and Innovation policy agenda for Nature-Based Solutions & Re-Naturing Cities. Brussels.
- European Commission (2021). *Evaluating the impact of nature-based solutions projects*.

European Commission (2021). Nature-based solutions: State of the Art in EU-funded projects.

European Commission. (2015). *Towards an EU Research and Innovation policy agenda for Nature-Based Solutions & Re-Naturing Cities*. Publications Office of the European Union.

European Commission. Directorate General for Research and Innovation (2015). *Towards an EU Research and Innovation Policy Agenda for Nature-Based Solutions & Re-Naturing Cities: Final Report of the Horizon 2020 Expert Group on ‘Nature Based Solutions and Re-Naturing Cities’*: (Full Version); Publications Office of the European Union: Luxembourg.

European Environment Agency (2016). Urban adaptation to climate change in Europe 2016. Transforming cities in a changing climate. EEA Report, No. 12/2026

European Environment Agency (2019). *Nature-based solutions in Europe: Policy, knowledge and practice*.

Federal Emergency Management Agency (2021) Guidance for flood risk analysis and mapping: floodway analysis and mapping. Federal Emergency Management Agency.

Fennell, J., Soulsby, C., Wilkinson, M. E., Daalmans, R., & Geris, J. (2023). Time variable effectiveness and cost-benefits of different nature-based solution types and design for drought and flood management. *Nature-Based Solutions*, 3, 100050.

Fenner Andrew, R. (2017). Spatial evaluation of multiple benefits to encourage multi-functional design of sustainable drainage in blue-green cities. *Water*, 9(12), 953.

Ferreira, C. S., Mourato, S., Kasanin-Grubin, M., Ferreira, A. J., Destouni, G., & Kalantari, Z. (2020). Effectiveness of nature-based solutions in mitigating flood hazard in a mediterranean peri-urban catchment. *Water*, 12(10), 2893.

Ferreira, M. J., & da Rocha, H. R. (2023). Green roof infrastructure outperforms grey technology in flood mitigation in São Paulo’s urbanized region. *Frontiers in Built Environment*, 9, 1254942.

Fletcher T. D. και συν. (2015). SUDS, LID, BMPs, WSUD and more. *Water Research* 77: 209–228. EPA, 2014

Fletcher T.D. et al. (2015). SUDS, LID, BMPs: the evolution and application of terminology. *Urban Water Journal*.

Fletcher T.D.; Shuster W.; Hunt W.F.; Ashley R.; Butler D.; Arthur S.; Trowsdale S.; Barraud S.; Semadeni-Davies A.; Bertrand-Krajewski J.-L.; et al. (2015). SUDS, LID, BMPs, WSUD and More—The Evolution and Application of Terminology Surrounding Urban Drainage. *Urban Water Journal* 12, pp. 525–542.

- Fletcher, T. D., Shuster, W., Hunt, W. F., et al. (2015). SUDS, LID, BMPs, WSUD and more – The evolution of terminology. *Urban Water Journal*, 12(7), 525–542.
- Foresight (2004). Future Flooding: Executive Summary; Office of Science and Technology: London, UK
- Fossey, M., Rousseau, A. N., & Savary, S. (2016). Assessment of the impact of spatio - temporal attributes of wetlands on stream flows using a hydrological modelling framework: a theoretical case study of a watershed under temperate climatic conditions. *Hydrological Processes*, 30(11), 1768-1781.
- Frantzeskaki, N., McPhearson, T., Collier, M. J., Kendal, D., Bulkeley, H., Dumitru, A., ... & Pintér, L. (2019). Nature-based solutions for urban climate change adaptation: linking science, policy, and practice communities for evidence-based decision-making. *BioScience*, 69(6), 455-466.
- Frantzeskaki, N., Kabisch, N., McPhearson, T., & others (2015). *Nature-based solutions for urban climate change adaptation*. Landscape and Urban Planning.
- Freeze R. A., Cherry J. A. (1979). Groundwater. Prentice Hall.
- Gao, J., Wang, R., Huang, J., & Liu, M. (2015). Application of BMP to urban runoff control using SUSTAIN model: Case study in an industrial area. *Ecological Modelling*, 318, 177-183.
- Giacomoni, M. H., & Joseph, J. (2017). Multi-objective evolutionary optimization and Monte Carlo simulation for placement of low impact development in the catchment scale. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 143(9), 04017053.
- Gill, S. E., Handley, J. F., Ennos, A. R., & Pauleit, S. (2007). Adapting cities for climate change: the role of the green infrastructure. *Built environment*, 33(1), 115-133.
- Gorud-Colvert, K., et al. (2014). The MPA Guide: A framework to achieve global goals for the ocean. *Science*, 350(6255), 45–48.
- Gu X., Liao Z., Zhang G., Xie J., Zhang J. (2017) Modelling the effects of water diversion and combined sewer overflow on urban inland river quality. *Environmental Science and Pollution Research* 24, pp. 21038–21049, <https://doi.org/10.1007/s11356-017-9686-x>.
- Guan M., Sillanpää N., Koivusalo H. (2015). Assessment of LID practices for restoring predevelopment runoff regime in an urbanized catchment in southern Finland, *Water Science and Technology* 71, pp. 1485–1491, <https://doi.org/10.2166/wst.2015.129>.
- Guida, R. J., Swanson, T. L., Remo, J. W. F., & Kiss, T. (2015). Strategic floodplain reconnection for the Lower Tisza River, Hungary: Opportunities for flood-height reduction and floodplain-wetland reconnection. *Journal of Hydrology*, 521, 274–285. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.11.080>

- Guido, B. I., Popescu, I., Samadi, V., & Bhattacharya, B. (2023). An integrated modelling approach to evaluate the impacts of nature-based solutions of flood mitigation across a small watershed in the southeast United States. *Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions*, 2023, 1-30.
- Haase, D. (2016). Reflections about blue ecosystem services in cities. *Sustainability of Water Quality and Ecology*, 5, 77–83.
- Hamers, E. M., Maier, H. R., Zecchin, A. C., & van Delden, H. (2023). Effectiveness of Nature-Based Solutions for Mitigating the Impact of Pluvial Flooding in Urban Areas at the Regional Scale. *Water*, 15(4), 642. <https://doi.org/10.3390/w15040642>
- Hammond M.J., Chen A.S., Djordjević S.; Butler D., Mark O. (2015). Urban flood impact assessment: A state-of-the-art review. *Urban Water Journal* 12, pp. 14–29.
- Hankin, B., Hewitt, I., Sander, G., Danieli, F., Formetta, G., Kamilova, A., ... & Lamb, R. (2020). A risk-based network analysis of distributed in-stream leaky barriers for flood risk management. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 20(10), 2567-2584.
- Hankin, B., Page, T., McShane, G., Chappell, N., Spray, C., Black, A., & Comins, L. (2021). How can we plan resilient systems of nature-based mitigation measures in larger catchments for flood risk reduction now and in the future?. *Water Security*, 13, 100091.
- Hankin, B., Page, T., McShane, G., Chappell, N., Spray, C., Black, A., & Comins, L. (2021). How can we plan resilient systems of nature-based mitigation measures in larger catchments for flood risk reduction now and in the future?. *Water Security*, 13, 100091.
- Hauck, T. E., & Weisser, W. W. (2015). AAD animal-aided design.
- Herath, H. M. B. S., & Nayanajith, J. (2025). Land Use Changes and Sustainability: A Review of Geospatial, AI and Socioeconomic Approaches. *Journal of Geography, Environment and Earth Science International*, 29(11), 144-162.
- Herath, P., & Bai, X. (2024). Benefits and co-benefits of urban green infrastructure for sustainable cities: Six current and emerging themes. *Sustainability Science*, 19(4), 1039–1063. <https://doi.org/10.1007/s11625-024-01475-9>
- Herrera, J., Bonilla, C. A., Castro, L., Vera, S., Reyes, R., & Gironás, J. (2017). A model for simulating the performance and irrigation of green stormwater facilities at residential scales in semiarid and Mediterranean regions. *Environmental Modelling & Software*, 95, 246-257.
- Holling C.S. (1973) Resilience and stability of ecological systems. *Annual Review of Ecology, Evolution and Systematics* 4: 1–23.

- Horstman, E. M., Dohmen-Janssen, C. M., Narra, P. M. F., Van den Berg, N. J. F., Siemerink, M., & Hulscher, S. J. (2014). Wave attenuation in mangroves: A quantitative approach to field observations. *Coastal engineering*, 94, 47-62.
- Hua P., Yang W., Qi X., Jiang Xie, J., Gu X., Li H., Zhang J., Krebs, P. (2020). Evaluating the effect of urban flooding reduction strategies in response to design rainfall and low impact development. *Journal of Cleaning Production* 242, pp. 118515, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118515>.
- Huang, C. L., Hsu, N. S., Liu, H. J., & Huang, Y. H. (2018). Optimization of low impact development layout designs for megacity flood mitigation. *Journal of hydrology*, 564, 542-558.
- Iacob, O., Brown, I., & Rowan, J. (2017). Natural flood management, land use and climate change trade-offs: the case of Tarland catchment, Scotland. *Hydrological Sciences Journal*, 62(12), 1931-1948.
- ICLEI – Local Governments for Sustainability (2017). Nature-based solutions in cities: Policy, practice and governance for urban resilience. Bonn: ICLEI.
- IPCC (2022). *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*.
- IPCC (2022). Sixth Assessment Report – Working Group II.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). (2022). Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press
- Jackson, D. L. (2002). *The farm as natural habitat: Reconnecting food systems with ecosystems*. Washington. D. C.: Island.
- Jayasooriya, V. M., & Ng, A. W. M. (2014). Tools for modeling of stormwater management and economics of green infrastructure practices: A review. *Water, Air, & Soil Pollution*, 225(8), 2055.
- Jia H., Wang Z.; Zhen X.; Clar M.; Yu S.L. (2017). China's Sponge City Construction: A Discussion on Technical Approaches. *Frontiers of Environmental Science Engineering* 11, pp. 18.
- Jia, H., Yao, H., Tang, Y., Yu, S. L., Field, R., & Tafuri, A. N. (2015). LID-BMPs planning for urban runoff control and the case study in China. *Journal of environmental management*, 149, 65-76.
- Jonkman S.N., Curran A., Bouwer L.M. (2024). Floods have become less deadly: an analysis of global flood fatalities 1975-2022. *Natural Hazards* 120: pp. 6327-6342

- Joyce, J., Chang, N. B., Harji, R., Ruppert, T., & Imen, S. (2017). Developing a multi-scale modeling system for resilience assessment of green-grey drainage infrastructures under climate change and sea level rise impact. *Environmental Modelling & Software*, 90, 1-26.
- Kabisch N., Korn H., Stadler J., Bonn A. (2016). Nature-based solutions and climate change – four shades of green. In: *Nature-Based Solutions to Climate Change Adaptation in Urban Areas*. Springer.
- Kabisch, N., Korn, H., Stadler, J., & Bonn, A. (2016). *Nature-based solutions to climate change adaptation in urban areas*. Springer.
- Kabisch, N., Korn, H., Stadler, J., & Bonn, A. (2017). *Nature-based solutions to climate change adaptation in urban areas*. Springer.
- Kaeseberg T., Kaeseberg M., Zhang J., Jawitz J.W., Krebs P., Rao P.S.C. (2018). The nexus of inhabitants and impervious surfaces at city scale—wastewater and stormwater travel time distributions and an approach to calibrate diurnal variations, *Urban Water Journal* 15, pp. 576–583, <https://doi.org/10.1080/1573062x.2018.1529189>
- Karamouz, M., & Nazif, S. (2013). Reliability-based flood management in urban watersheds considering climate change impacts. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 139(5), 520-533.
- Kaspersen, P. S., & Halsnæs, K. (2017). *Integrated climate change risk assessment: A practical application for urban flooding*. Climate Risk Management.
- Kayendeke, E. J., Kansime, F., French, H. K., & Bamutaze, Y. (2018). Spatial and temporal variation of papyrus root mat thickness and water storage in a tropical wetland system. *Science of the total environment*, 642, 925-936.
- Keskitalo, E. C. H. (Ed.) (2013). *Climate Change and Flood Risk Management*. Edward Elgar Publishing.
- Khastagir, A., & Jayasuriya, L. N. N. (2010). Impacts of using rainwater tanks on stormwater harvesting and runoff quality. *Water science and technology*, 62(2), 324-329.
- Kingsbury - Smith, L., Willis, T., Smith, M., Boisgontier, H., Turner, D., Hirst, J., ... & Klaar, M. (2023). Evaluating the effectiveness of land use management as a natural flood management intervention in reducing the impact of flooding for an upland catchment. *Hydrological Processes*, 37(4), e14863
- Kleinen T., Petschel-Held G. (2007). Integrated assessment of changes in flooding
- Klijn, F., de Bruin, D., de Hoog, M. C., Jansen, S., & Sijmons, D. F. (2013). Design quality of room-for-the-river measures in the Netherlands: role and assessment of the quality team (Q-team). *International Journal of River Basin Management*, 11(3), 287-299.

- Koskela, H., & Pain, R. (2000). Revisiting fear and place: women's fear of attack and the built environment. *Geoforum*, 31(2), 269-280.
- Krivtsov, V., Buckman, J., Birkinshaw, S., & Olive, V. (2024). Interactions of hydrology, geochemistry, and biodiversity in woodland ponds located in riverine floodplains: case study from Scotland. *Environmental Science and Pollution Research*, 31(28), 40678-40693.
- Kuller, M., Farrelly, M., Deletic, A., & Bach, P. M. (2018). Building effective Planning Support Systems for green urban water infrastructure—Practitioners' perceptions. *Environmental Science & Policy*, 89, 153-162.
- Kundzewicz Z.W., Kanae S., Seneviratne S.I., Handmer J., Nicholls N., Peduzzi P. (2014). Flood risk and climate change: Global and regional perspectives. *Hydrological Sciences Journal* 59, pp. 1–28.
- Kundzewicz Z.W., Ulbrich U., Brücher T., Graczyk D., Krüger A., Leckebusch G. C., Menzel L., Pińskwar I., Radziejewski M. και Szwed M. (2005). Summer floods in Central Europe – climate change track? *Natural Hazards*, 36(1–2), 165–189.
- Lama, G. F. C., Rillo Migliorini Giovannini, M., Errico, A., Mirzaei, S., Padulano, R., Chirico, G. B., & Preti, F. (2021). Hydraulic efficiency of green-blue flood control scenarios for vegetated rivers: 1D and 2D unsteady simulations. *Water*, 13(19), 2620.
- Lammers, R. W., Chambers, M., & Bledsoe, B. P. (2024). Modeling the effects of levee setbacks on flood hydraulics. *Journal of Flood Risk Management*, 17(1), e12963.
- Larsen T.A., Hoffmann S., Lüthi C., Truffer B., Maurer M. (2016). Emerging solutions to the water challenges of an urbanizing world. *Science* 352, pp. 928, <https://doi.org/10.1126/science.aad8641>.
- Lavers, T., Charlesworth, S. M., Lashford, C., Warwick, F., & Fried, J. (2022). The performance of natural flood management at the large catchment-scale: A case study in the Warwickshire Stour Valley. *Water*, 14(23), 3836.
- Lawson, E., Thorne, C., Ahilan, S., Allen, D., Arthur, S., Everett, G., ... & Wright, N. (2014). Delivering and evaluating the multiple flood risk benefits in blue-green cities: An interdisciplinary approach. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 184(21), 113-124.. CIRIA.
- Lefèvre, F., Boivin, T., Bontemps, A., Courbet, F., Davi, H., Durand-Gillmann, M., ... & Pichot, C. (2014). Considering evolutionary processes in adaptive forestry. *Annals of Forest Science*, 71(7), 723-739.

- Leslie, S., John, R. J., Khalid, A., Jenny, X. Z., Sabu, P., and Teresa, R. (2009) SUSTAIN – A Framework for Placement of Best Management Practices in Urban Watersheds to Protect Water Quality, Environmental Protection Agency, Washington, D.C., 2009.
- Li, C., Liu, M., Hu, Y., Han, R., Shi, T., Qu, X., & Wu, Y. (2018). Evaluating the hydrologic performance of low impact development scenarios in a micro urban catchment. *International journal of environmental research and public health*, 15(2), 273.
- Li, J., Deng, C., Li, H., Ma, M., & Li, Y. (2018). Hydrological environmental responses of LID and approach for rainfall pattern selection in precipitation data-lacked region. *Water Resources Management*, 32(10), 3271-3284.
- Liao, K. W., Thedy, J., & Tai, C. C. (2024). Fluvial flood adaptation using nature-based solutions: A comprehensive and effective assessment of hydro-meteorological risks. *Science of the Total Environment*, 912, 169329.
- Line D., Brown R., Hunt W., Lord W. (2011). Effectiveness of LID for commercial development in North Carolina. *Journal of Environmental Engineering* 138, pp. 680–688, [https://doi.org/10.1061/\(asce\)ee.1943-7870.0000515](https://doi.org/10.1061/(asce)ee.1943-7870.0000515).
- Liu L.; Jensen M.B., (2018). Green Infrastructure for Sustainable Urban Water Management: Practices of Five Forerunner Cities. *Cities* 74, pp. 126–133.
- Liu, J., Wang, J., Xiong, J., Cheng, W., Cui, X., He, W., ... & Wang, N. (2021). Dynamic assessment of the flood risk at basin scale under simulation of land-use scenarios and spatialization technology of factor. *Water*, 13(22), 3239.
- Liu, S., & Wang, X. (2021). Reexamine the value of urban pocket parks under the impact of the COVID-19. *Urban Forestry & Urban Greening*, 64, 127294.
- Liu, Y., Bralts, V. F., & Engel, B. A. (2015). Evaluating the effectiveness of management practices on hydrology and water quality at watershed scale with a rainfall-runoff model. *Science of the Total Environment*, 511, 298-308.
- Loc, H. H., Duyen, P. M., Ballatore, T. J., Lan, N. H. M., & Das Gupta, A. (2017). Applicability of sustainable urban drainage systems: an evaluation by multi-criteria analysis. *Environment Systems and Decisions*, 37(3), 332-343.
- Loos, J. R., & Rogers, S. H. (2016). Understanding stakeholder preferences for flood adaptation alternatives with natural capital implications. *Ecology and Society*, 21(3).
- Lyytimäki, J., Petersen, L. K., Normander, B., & Bezák, P. (2008). Nature as a nuisance? Ecosystem services and disservices to urban lifestyle. *Environmental Sciences*, 5(3), 161-172.

- MacKinnon K., Sobrevila C., Hickey V. (2008). Biodiversity, climate change, and adaptation: nature-based solutions from the World Bank portfolio. World Bank, Washington, DC.
- Martinez-Martinez, E., Nejadhashemi, A. P., Woznicki, S. A., & Love, B. J. (2014). Modeling the hydrological significance of wetland restoration scenarios. *Journal of environmental management*, 133, 121-134.
- Mei, C., Liu, J., Wang, H., Yang, Z., Ding, X., & Shao, W. (2018). Integrated assessments of green infrastructure for flood mitigation to support robust decision-making for sponge city construction in an urbanized watershed. *Science of the Total Environment*, 639, 1394-1407.
- Mitchell V.G. (2006). Applying integrated urban water management concepts: a review of Australian experience. *Journal of Environmental Management* 37, pp. 589–605, <https://doi.org/10.1007/s00267-004-0252-1>
- Nature (2017). Nature-based solutions: New green jargon or real solutions? *Nature*, 541, p. 133–134.
- Nature's Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems. Washington, DC: National Academy Press.
- Nature-based Solutions to address global societal challenges. Gland, Switzerland: International Union for Conservation of Nature.
- Nature-based solutions. OpenNESS Ecosystem Services Reference Book.
- Nature4Cities Consortium (2020). *Deliverables and final report*.
- Naumann, S., Davis, M., Kaphengst, T., Pieterse, M., & Rayment, M. (2011). Design, implementation and cost elements of Green Infrastructure projects. *Final report, European Commission, Brussels*, 138, 144-155.
- Nesshöver και συν. (2017). The science, policy and practice of Nature-Based Solutions. *Science of the Total Environment* 579: 1215–1227.
- Nesshöver, C., Assmuth, T., Irvine, K. N., Rusch, G. M., Waylen, K. A., Delbaere, B., Haase, D., Jones-Walters, L., Keune, H., Kovacs, E., Krauze, K., Külvik, M., Rey, F., van Dijk, J., Vistad, O. I., Wilkinson, M. E., & Wittmer, H. (2017). The science, policy and practice of nature-based solutions: An interdisciplinary perspective. *Science of the Total Environment*, 579, 1215–1227. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.11.106>
- Neumayer, M., Teschemacher, S., Schloemer, S., Zahner, V., & Rieger, W. (2020). Hydraulic modeling of beaver dams and evaluation of their impacts on flood events. *Water*, 12(1), 300.

- Newman, P., Beatley, T., & Boyer, H. (2017). *Resilient Cities: Overcoming Fossil Fuel Dependence*. Island Press.
- Nordman, E. E., Isely, E., Isely, P., & Denning, R. (2018). Benefit-cost analysis of stormwater green infrastructure practices for Grand Rapids, Michigan, USA. *Journal of Cleaner Production*, 200, 501-510.
- NYC Department of Environmental Protection (2010). *Green Infrastructure Plan*.
- O'Donnell, E. C., Lamond, J. E., & Thorne, C. R. (2017). Recognising barriers to implementation of Blue-Green Infrastructure: a Newcastle case study. *Urban Water Journal*, 14(9), 964-971.
- O'Donnell, E. C., Woodhouse, R., & Thorne, C. R. (2018, August). Evaluating the multiple benefits of a sustainable drainage scheme in Newcastle, UK. In *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Management* (Vol. 171, No. 4, pp. 191-202). Thomas Telford Ltd.
- Oracai Zare, S., Saghaian, B., & Shamsai, A. (2012). Multi-objective optimization for combined quality–quantity urban runoff control. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(12), 4531-4542.
- Osawa, T., Nishida, T., & Oka, T. (2020). High tolerance land use against flood disasters: How paddy fields as previously natural wetland inhibit the occurrence of floods. *Ecological Indicators*, 114, Article 106306. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106306>
- Ossa-Moreno, J., Smith, K. M., & Mijic, A. (2017). Economic analysis of wider benefits to facilitate sustainable urban drainage system uptake. *Journal of Environmental Management*, 196, 502–511.
- Ourloglou, O., Stefanidis, K., & Dimitriou, E. (2020). Assessing nature-based and classical engineering solutions for flood-risk reduction in urban streams. *Journal of Ecological Engineering*, 21(2), 46-56.
- Pauleit S., Zölch T., Hansen R., Randrup T., Konijnendijk van den Bosch C. (2017). Nature-based solutions and climate change – four shades of green. In: *Nature-Based Solutions to Climate Change Adaptation in Urban Areas*. Springer.
- Pauleit, S., Zölch, T., Hansen, R., & Randrup, T. B. (2017). Nature-based solutions and climate change – Four shades of Green. In A. Kabisch, N. Korn, H. Stadler, & J. Bonn (Eds.). *Nature-based solutions to climate change adaptation in Urban areas: Linkages*
- Peng, X., Heng, X., Li, Q., Li, J., & Yu, K. (2022). From sponge cities to sponge watersheds: Enhancing flood resilience in the Sishui River Basin in Zhengzhou, China. *Water*, 14(19), 3084.

- Penny, J., Alves, P. B., De-Silva, Y., Chen, A. S., Djordjević, S., Shrestha, S., & Babel, M. (2023). Analysis of potential nature-based solutions for the Mun River Basin, Thailand. *Water Science & Technology*, 87(6), 1496-1514.
- Potočki, K., Bekić, D., Bonacci, O., & Kulić, T. (2021). Hydrological aspects of nature-based solutions in flood mitigation in the Danube River Basin in Croatia: Green vs. Grey approach. In *Nature-based solutions for flood mitigation: environmental and socio-economic aspects* (pp. 263-288). Cham: Springer International Publishing.
- probabilities due to climate change. *Climatic Change*, 81(3-4), 283-312
- Prudencio L.; Null S.E. (2018). Stormwater Management and Ecosystem Services: A Review. *Environmental Research Letters* 13, 033002.
- Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-56091-5>.
- Qin H., Li Z., Fu G. (2013). The effects of low impact development on urban flooding under different rainfall characteristics. *Journal of Environmental Management* 129, pp. 577-585, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.08.026>.
- Quarantelli E. (2003). Urban Vulnerability to Disasters in Developing Countries: Managing Risks. BUILDING Safer Cities: The Future of Disaster Risk. The World Bank: Washington, DC, USA, pp. 211-232.
- Ráška, P., Bezak, N., Ferreira, C. S., Kalantari, Z., Banasik, K., Bertola, M., ... & Hartmann, T. (2022). Identifying barriers for nature-based solutions in flood risk management: An interdisciplinary overview using expert community approach. *Journal of environmental management*, 310, 114725.
- Rawls, W. J., Brakensiek, D. L., & Logsdon, S. D. (1993). Predicting saturated hydraulic conductivity utilizing fractal principles. *Soil Science Society of America Journal*, 57(5), 1193-1197.
- Raymond, C. M., Frantzeskaki, N., Kabisch, N., Berry, P., Breil, M., Nita, M. R., Calfapietra, C., et al. (2017). A framework for assessing and implementing the co-benefits of nature-based solutions in urban areas. *Environmental Science & Policy*, 77, 15-24.
- Remo, J. W., Pinter, N., & Heine, R. (2009). The use of retro-and scenario-modeling to assess effects of 100+ years river of engineering and land-cover change on Middle and Lower Mississippi River flood stages. *Journal of Hydrology*, 376(3-4), 403-416.
- Revell, N., Lashford, C., Rubinato, M., & Blackett, M. (2022). The impact of tree planting on infiltration dependent on tree proximity and maturity at a clay site in Warwickshire, England. *Water*, 14(6), 892. <https://doi.org/10.3390/w14060892>
- Rossman L. (2010). Modeling low impact development alternatives with SWMM, *Journal of Water Management Model*. <https://doi.org/10.14796/jwmm.r236-11>, 2366-R311.

- Rozos, E., Makropoulos, C., & Maksimović, Č. (2013). Rethinking urban areas: an example of an integrated blue-green approach. *Water Science and Technology: Water Supply*, 13(6), 1534-1542.
- Ruangpan, L., et al. (2020). Nature-based solutions for hydro-meteorological risk reduction: A state-of-the-art review. *Science of the Total Environment*, 696, 133–147.
- Sabeti, R., Kjeldsen, T. R., Stamataki, I., & Rahi, B. (2024b). Optimisation of hardware setups for time-efficient HEC-RAS simulations. *Cambridge Prisms: Water*, 2, e13.
- Sabeti, R., Stamataki, I., & Kjeldsen, T. R. (2024a). Reconstructing the 1968 River Chew flash flood: merging a HEC-RAS 2D hydraulic modelling approach with historical evidence. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 15(1), 2377655.
- Sajinkumar, K. S., Arya, A., Rajaneesh, A., Oommen, T., Yunus, A. P., Rani, V. R., ... & Thrivikramji, K. P. (2022). Migrating rivers, consequent paleochannels: The unlikely partners and hotspots of flooding. *Science of the Total Environment*, 807, 150842.
- Sarchani, S., Seiradakis, K., Coulibaly, P., & Tsanis, I. (2020). Flood inundation mapping in an ungauged basin. *Water*, 12(6), 1532.
- Savini J.C., Kammerer J.C. (1961). Urban Growth and the Water Regimen. *USGS Water Supply Paper 1591-A*. U.S. Geological Survey.
- Schubert, J. E., Burns, M. J., Fletcher, T. D., & Sanders, B. F. (2017). A framework for the case-specific assessment of Green Infrastructure in mitigating urban flood hazards. *Advances in Water Resources*, 108, 55-68.
- Science for Environmental Policy (2021). The Solution is in Nature. *Future Brief 24*. Brief Produced for the European Commission DG Environment.
- Sciuto, L., Licciardello, F., Scavera, V., Verde, D., Giuffrida, E. R., & Cirelli, G. L. (2024). The role of nature-based solutions for the water flow management in a Mediterranean urban area. *Ecological Engineering*, 208, 107375.
- Semadeni-Davies, A., Hernebring, C., Svensson, G., & Gustafsson, L. G. (2008). The impacts of climate change and urbanisation on drainage in Helsingborg, Sweden: Combined sewer system. *Journal of Hydrology*, 350(1-2), 100-113.
- Shrubsole D., Brooks G., Halliday R., Haque E., Kumar A., Lacroix J., Rasid H., Rouselle J., Simonovic S.P. (2003). An Assessment of Flood Risk Management in Canada. *Institute for Catastrophic Loss Reduction Research (ICLR) Paper Series No. 28*.
- Singh V. P. (1992). *Elementary Hydrology*. Prentice Hall.
- Sowińska-Świerkosz B., García J. (2021). A new evaluation framework for nature-based solutions (NBS) projects based on the application of performance questions and indicators approach. *Science of the Total Environment* 787: 147615.

- Strecker, E. W., Quigley, M. M., Urbonas, B. R., Jones, J. E., & Clary, J. K. (2001). Determining urban storm water BMP effectiveness. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 127(3), 144-149.
- Tantrige Osada M., Peiris V. (2024). Assessment of Urban Resilience to Floods: A Spatial Planning Framework for Cities. *Sustainability* 16:9117
- Tao, J., Li, Z., Peng, X., & Ying, G. (2017). Quantitative analysis of impact of green stormwater infrastructures on combined sewer overflow control and urban flooding control. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 11(4), 11.
- Tara, A., Ninsalam, Y., Tarakemeh, N., & Muni, V. (2020). Designing with nature-based solutions to mitigate flooding in Mataniko River catchment, Honiara. *J. Digit. Landsc. Archit*, 1, 457-466.
- Theochari, A. P., & Baltas, E. (2024). The Nature-Based Solutions and climate change scenarios toward flood risk management in the greater Athens area—Greece. *Natural Hazards*, 120(5), 4729-4747.
- Thomas, H., & Nisbet, T. R. (2007). An assessment of the impact of floodplain woodland on flood flows. *Water and Environment Journal*, 21(2), 114-126.
- Thomas, H., & Nisbet, T. R. (2016). Slowing the flow in Pickering: Quantifying the effect of catchment woodland planting on flooding using the soil conservation service curve number method. *International Journal of Safety and Security Engineering*, 6, 12-20.
- U.N. (2019). World Urbanization Prospects: The 2018 Revision; United Nations Department of Economic Social Affairs: New York, NY, USA.
- UN-Habitat (2020). Enhancing urban resilience through Nature-Based Solutions.
- UNISDR (2005). Hyogo Framework for Action 2005–2015: Building the Resilience of Nations and Communities to Disasters. *United Nations Inter-Agency Secretariat of the International Strategy for Disaster Reduction (UNISDR)*: Kobe, Hyogo, Japan, p. 25.
- US-EPA, “How do Wetlands Function and Why are they Valuable?,” US-EPA Website. (Accessed 21 June 2024). [Online]. Available: <https://www.epa.gov/wetlands/how-do-wetlands-function-and-why-are-they-valuable>
- Viessman W., Lewis G. L. (2003). Introduction to Hydrology (5th ed.). Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.
- Vojinovic, Z., Alves, A., Gómez, J. P., Weesakul, S., Keerakamolchai, W., Meesuk, V., & Sanchez, A. (2021). Effectiveness of small-and large-scale Nature-Based Solutions for flood mitigation: The case of Ayutthaya, Thailand. *Science of the Total Environment*, 789, 147725.

- Voskamp, I. M., & Van de Ven, F. H. (2015). Planning support system for climate adaptation: Composing effective sets of blue-green measures to reduce urban vulnerability to extreme weather events. *Building and Environment*, 83, 159-167.
- Wang P., Wu X., Hao Y., Wu C., Zhang J. (2019). Is Southwest China drying or wetting? Spatiotemporal patterns and potential causes. *Theoretical and Applied Climatology* 1–15, <https://doi.org/10.1007/s00704-019-02935-4>.
- Wang, Q., Guidolin, M., Savic, D., & Kapelan, Z. (2015). Two-objective design of benchmark problems of a water distribution system via MOEAs: Towards the best-known approximation of the true Pareto front. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 141(3), 04014060.
- Wang, W., Zhang, B., Zhou, W., Lv, H., Xiao, L., Wang, H., ... & He, X. (2019). The effect of urbanization gradients and forest types on microclimatic regulation by trees, in association with climate, tree sizes and species compositions in Harbin city, northeastern China. *Urban Ecosystems*, 22(2), 367-384.
- Warachowska, W., Alvarez, X., Bezak, N., Gómez-Rúa, M., Janeiro-Otero, A., Matczak, P., ... & Zupanc, V. (2021). A cooperative game for upstream–downstream river flooding risk prevention in four European River basins. In *Nature-Based Solutions for Flood Mitigation: Environmental and Socio-Economic Aspects* (pp. 379-397). Cham: Springer International Publishing.
- Ward, P. J., Pauw, W. P., Van Buuren, M. W., & Marfai, M. A. (2013). Governance of flood risk management in a time of climate change: the cases of Jakarta and Rotterdam. *Environmental Politics*, 22(3), 518-536.
- Watson, K. B., Ricketts, T., Galford, G., Polasky, S., & O'Neil-Dunne, J. (2016). Quantifying flood mitigation services: The economic value of Otter Creek wetlands and floodplains to Middlebury, VT. *Ecological Economics*, 130, 16-24.
- Webber, J. L., Fu, G., & Butler, D. (2018). Rapid surface water intervention performance comparison for urban planning. *Water Science and Technology*, 77(8), 2084-2092.
- Whelans, C., Maunsell, H. G., & Thompson, P. (1994). Planning and management guidelines for water sensitive urban (residential) design. *Department of Planning and Urban Development of Western Australia, Perth, Australia*.
- Whitfield P.H., Burn D.H., Hannaford J., Higgins H., Hodgkins G.A., Marsh T., Looser U. (2012) Reference hydrologic networks I. The status and potential future directions of national reference hydrologic networks for detecting trends. *Hydrological Sciences Journal* 57, pp. 1562–1579.

- Wu, J., Yang, R., & Song, J. (2018). Effectiveness of low-impact development for urban inundation risk mitigation under different scenarios: a case study in Shenzhen, China. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 18(9), 2525-2536.
- Yadav, A., & Singh, R. M. (2025). The role of channel modification in flood mitigation: a study using HEC-RAS. *Water Resources Management*, 39(6), 2841-2855.
- Yang, W., Brüggemann, K., Seguya, K. D., Ahmed, E., Kaeseberg, T., Dai, H., ... & Krebs, P. (2020). Measuring performance of low impact development practices for the surface runoff management. *Environmental Science and Ecotechnology*, 1, 100010.
- Yang, Y., & Chui, T. F. M. (2018). Integrated hydro-environmental impact assessment and alternative selection of low impact development practices in small urban catchments. *Journal of environmental management*, 223, 324-337.
- Yazdi, J., & Neyshabouri, S. S. (2014). Identifying low impact development strategies for flood mitigation using a fuzzy-probabilistic approach. *Environmental Modelling & Software*, 60, 31-44.
- Yeo, I. Y., Lang, M. W., Lee, S., McCarty, G. W., Sadeghi, A. M., Yetemen, O., & Huang, C. (2019). Mapping landscape-level hydrological connectivity of headwater wetlands to downstream waters: A geospatial modeling approach-Part 1. *Science of the Total Environment*, 653, 1546-1556.
- Zhang J., Hua P., Krebs P. (2015a). The build-up dynamic and chemical fractionation of Cu, Zn and Cd in road-deposited sediment. *Science of the Total Environment* 532, pp. 723–732, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.06.074>.
- Zhang W., Villarini G., Vecchi G.A., Smith J.A. (2018). Urbanization exacerbated the rainfall and flooding caused by hurricane Harvey in Houston, *Nature* 563, pp. 384–388, <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0676-z>.
- Zhang Y. (2021) Research on the Risk Zoning of Urban Rainstorm and Flood Disasters Considering Spatial Distribution Characteristics. Master's Thesis, Nanjing Normal University, Nanjing, China.
- Zhang, K., & Chui, T. F. M. (2018). A comprehensive review of spatial allocation of LID-BMP-GI practices: Strategies and optimization tools. *Science of the Total Environment*, 621, 915-929.
- Zhou Y., Tao P., Shi R. (2019). Research progress on risk assessment of rainstorm flood disaster in China. *Rainstorm Disaster* 38, pp. 494–501.
- Zhu, Z., & Chen, X. (2017). Evaluating the effects of low impact development practices on urban flooding under different rainfall intensities. *Water*, 9(7), 548.

- Βασιλοπούλου Χ. (2017). Υδρο-ευαίσθητος αστικός σχεδιασμός και φυσικές υποδομές νερού – Η περίπτωση του Πάρκου Τρίτση. Διπλωματική Εργασία. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
- EEA (European Environment Agency) (2024). Responding to climate change impacts on human health in Europe: focus on floods, droughts and water quality. EEA Report 3/2024 Εργασία, Αθήνα
- Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο και Συμβούλιο της Ευρωπαϊκής Ένωσης (2007). Οδηγία 2007/60/ΕΚ της 23ης Οκτωβρίου 2007 σχετικά με την αξιολόγηση και τη διαχείριση των κινδύνων πλημμύρας. Επίσημη Εφημερίδα της Ευρωπαϊκής Ένωσης, L 288, σσ. 27–34.
- Κανδηλιώτη Γ. Ι. (2009). Εκτίμηση Πλημμυρικής Επικινδυνότητας στο Υδατικό Διαμέρισμα της Αττικής. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Μεταπτυχιακή Διπλωματική
- Κουτσογιάννης, Δ., & Ξανθόπουλος, Θ. (2016). Τεχνική υδρολογία. [doi:10.13140/RG.2.1.4856.0888](https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4856.0888), Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 1999.
- Λέκκας Ε. (2000). Φυσικές και Τεχνολογικές Καταστροφές. Τομέας Δυναμικής, Τεκτονικής & Εφαρμοσμένης Γεωλογίας, Τμήμα Γεωλογίας & Γεωπεριβάλλοντος, Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών. ISBN: 960-90329-0-7.
- Μακρόπουλος και Κουτσογιάννης, 2016
- Μακρόπουλος Χ., Κουτσογιάννης Δ. (2016). Ο υδρολογικός κύκλος (The water cycle). *USGS Γεωλογική Υπηρεσία ΗΠΑ*
- Μαραγκουδάκη Ρ., Τσακίρης Γ. (2005). Επίδραση της αστικοποίησης στα χαρακτηριστικά της πλημμύρας. *5ο Εθνικό Συνέδριο της ΕΕΔΥΠ «Ολοκληρωμένη Διαχείριση Υδατικών Πόρων με βάση τη λεκάνη απορροής»*, Ξάνθη.
- Νταρακάς Ε. (2016). Τεχνική Περιβάλλοντος - Διεργασίες επεξεργασίας νερού και υγρών αποβλήτων. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, ISBN: 978-960-6706-91-2
- Παπανικολάου Δ., Διακάκης Μ. (2011). Μεταβολές στην ένταση και την κατανομή των φυσικών καταστροφών. Επιτροπή Μελέτης Επιπτώσεων Κλιματικής Αλλαγής.
- Τερζίδης, Γ. και Καραμούζης, Δ. Ν. (1986). Υδραυλική Υπόγειων Νερών. Ζήτη
- Τζήμα Κ. (2015). Διαχείριση κινδύνου πλημμύρας με σκοπό την προσαρμογή στην κλιματική αλλαγή μέσω υδραυλικών μεθόδων και τεχνολογιών GIS. Διπλωματική Εργασία, Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Τζιμόπουλος, Χ. (1983). Στραγγισεις - Υδραυλική Φρεατών. Ζήτη.

Υπεύθυνη Δήλωση Συγγραφέα:

Δηλώνω ρητά ότι, σύμφωνα με το άρθρο 8 του Ν.1599/1986, η παρούσα εργασία αποτελεί αποκλειστικά προϊόν προσωπικής μου εργασίας, δεν προσβάλλει κάθε μορφής δικαιώματα διανοητικής ιδιοκτησίας, προσωπικότητας και προσωπικών δεδομένων τρίτων, δεν περιέχει έργα/εισφορές τρίτων για τα οποία

απαιτείται άδεια των δημιουργών/δικαιούχων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής, οι πηγές δε που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον και πληρούν τους κανόνες της επιστημονικής παράθεσης.