



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ
ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ**

*«Συστήματα ήπιας διαχείρισης απορροών όμβριων υδάτων από
οδικά δίκτυα»*

Διπλωματική εργασία : Αλευράς Γεώργιος

Επιβλέπων : Μαμάης Δανιήλ, Καθηγητής ΕΜΠ

Το περιεχόμενο της ανά χείρας διπλωματικής εργασίας αποτελεί προϊόν της δικής μου πνευματικής προσπάθειας. Η αναφορά, ενσωμάτωση σε αυτήν υλικού τρίτων, δημοσιευμένου ή μη, γίνεται καλοπίστως με δόκιμη αναφορά στις πηγές, που δεν επιτρέπει ασάφειες ή παρερμηνείες.

Copyright © Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2022.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσεως, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης.

Περίληψη

Οι ουσίες που περιέχονται στα όμβρια ύδατα που προέρχονται από το οδικό δίκτυο είναι δυνατόν να είναι είτε επιβλαβείς, είτε θετικές για το περιβάλλον. Στην περίπτωση των επικίνδυνων συστατικών, αυτά είναι ικανά να αλλοιώσουν ποιοτικά το νερό που βρίσκεται τόσο κάτω από το έδαφος, όσο και πάνω σε αυτό. Αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας είναι η διαμόρφωση μη σημειακών ή αντίστοιχα σημειακών μορφών ρύπανσης του ύδατος. Το νερό της βροχής μεταφέρει τους ατμοσφαιρικούς ρύπους που βρίσκονται είτε εντός, είτε εκτός του οδικού δικτύου. Το νερό αυτό περιέχει διάφορα ρυπογόνα στοιχεία όπως, για παράδειγμα, φυτοφάρμακα. Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι να αναλυθούν με τη μέθοδο της βιβλιογραφικής ανασκόπησης μελετών από τη διεθνή βιβλιογραφία τα συστήματα συλλογής και διαχείρισης όμβριων υδάτων των αστικών οδικών δικτύων, με εστίαση στα “Βιώσιμα Αστικά Συστήματα Αποστράγγισης (Sustainable Drainage Systems – SuDS)”. Τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης έδειξαν ότι τα έργα SuDS, παρέχουν ένα χρήσιμο πλαίσιο για την παράδοση ενός σχεδίου που πληροί στόχους που έχουν συμφωνηθεί μεταξύ της κοινότητας και της ομάδας σχεδιασμού. Αυτά θα σχετίζονται ιδανικά με τη διαχείριση του κινδύνου πλημμύρας (ποσότητα νερού), την ποιότητα του νερού και την παροχή βιοποικιλότητας και ανέσεων. Μπορεί να μην είναι δυνατό να μεγιστοποιηθούν οι ευκαιρίες και για τους τρεις στόχους και ο βαθμός στον οποίο συμβαίνει αυτό θα πρέπει να συζητηθεί με τους σχετικούς ενδιαφερόμενους φορείς.

Λέξεις Κλειδιά: Οδικό Δίκτυο, Όμβρια Ύδατα, Βιώσιμα Αστικά Συστήματα Αποστράγγισης

Abstract

The substances contained in the rainwater coming from the road network can be either harmful or not useful for the environment. In the case of dangerous components, these are capable of altering the quality of the water that is both under the ground and on it. The result of this process is the formation of non-point or respectively point forms of water pollution. Rainwater transports atmospheric pollutants that are either inside or outside the private network. This water contains various pollutants such as pesticides. The purpose of this work is to analyze, using the method of bibliographic review of studies from the international literature, the rainwater collection and management systems of urban road networks, mainly focusing on "Sustainable Urban Drainage Systems (SuDS)". The results of this study showed that SuDS projects provide a useful framework for delivering a plan that meets objectives agreed between the community and the planning team. These will ideally relate to flood risk management (water quantity), water quality and the provision of biodiversity and amenities. It may not be possible to maximize opportunities for all three objectives and it should be discussed with relevant stakeholders.

Keywords: Road Network, Stormwater, Sustainable Urban Drainage Systems

Περιεχόμενα

Περίληψη	1
Abstract	2
1. Εισαγωγή	5
2. Ρύπανση Οδοστρώματος από τα Οχήματα.....	8
2.1. Ιστορική ανάλυση της ευαισθητοποίησης στον περιβαλλοντικό τομέα	8
2.2. Εφαρμοστέο νομοθετικό πλαίσιο στην Ευρωπαϊκή Ένωση	9
2.3. Επίδραση των Απορροών Ομβρίων Υδάτων από το Οδικό Δίκτυο στους Υδάτινους Αποδέκτες	12
2.4. Το Φαινόμενο «First Flush».....	24
2.5. Ιδιότητες που Αλλοιώνουν την Ποιότητα των Απορροών Ομβρίων	28
3. Διαχείριση Πλημμυρικών Φαινομένων στο Οδόστρωμα.....	30
3.1. Θεσμικό Πλαίσιο Διαχείρισης Πλημμυρών	30
3.2. Αρμόδιοι Φορείς Διαχείρισης Πλημμυρών στο Οδόστρωμα.....	33
4. Μείωση Απορροών Ομβρίων από Οδικά Δίκτυα.....	37
4.1. Το Μοντέλο Διαχείρισης Όμβριων Υδάτων	37
4.2. Παράγοντες Ελέγχου Συντελεστών Απορροής	39
4.3. Τεχνολογίες για τον Έλεγχο της Απορροής.....	40
4.4. Βέλτιστες Πρακτικές Διαχείρισης Απορροών	43
4.5. Αρχές Ελέγχου Απορροής για Δρόμους.....	44
5. Βιώσιμα Αστικά Συστήματα Συλλογής και Διαχείρισης Όμβριων Υδάτων σε Οδικά Δίκτυα	47
5.1. Η Έννοια της Βιώσιμης Οδικής Αποστράγγισης.....	47
5.2. Υδρολογική Απόδοση Συστημάτων Βιώσιμης Αποστράγγισης (SuDS) στην Άκρη του Δρόμου.....	49
5.3. Συστήματα Αειφόρου Αποστράγγισης (Sustainable drainage systems (SuDS)	52
5.3.1. Εφαρμογή SUDS για Αποστράγγιση Δρόμων.....	52
5.3.2. Διήθηση νερού	56
5.3.3. Φίλτρα στράγγισης (filter drains)	57
5.3.4. Τάφροι για αποστράγγιση δρόμων	58
5.3.5. Δρόμοι για διαχείριση ροής υπέρβασης (Exceedance Flow).....	59
5.3.6. Απορροή δρόμων	60
5.3.7. Σχεδιασμός ασφαλών SuDS δίπλα σε δρόμους.....	60
5.4. Σχεδιασμός SuDS Βάσει Ποσοτικών και Ποιοτικών Μεταβλητών των Υδάτων.....	61

5.5. Κριτήρια Υδραυλικού Σχεδιασμού	65
6. Συμπεράσματα.....	68
Βιβλιογραφία	73

1. Εισαγωγή

Είναι γεγονός ότι στον σύγχρονο κόσμο το ζήτημα της ρύπανσης του περιβάλλοντος θεωρείται πρωταρχικής σημασίας, ενώ η άμεση διαχείριση του εν λόγω θέματος παρουσιάζεται πιο επιτακτική από ποτέ. Η περιβαλλοντική καταστροφή είναι δυνατόν να εμφανιστεί ποικιλοτρόπως. Μια εκ των βασικότερων μορφών αυτής είναι η ρύπανση των υδάτινων πηγών, τόσο των υπόγειων όσο και των επιφανειακών. Ακολούθως, όπως έχει διαπιστωθεί, το βιοτικό επίπεδο κάθε κράτους είναι άρρηκτα συνδεδεμένο με την αντιμετώπιση των φαινομένων ρύπανσης που παρατηρούνται. Εντούτοις, η ρύπανση δεν αναφέρεται αποκλειστικά στα κράτη με χαμηλή οικονομική ανάπτυξη αλλά αντιθέτως, γίνεται αντιληπτή και στην κατηγορία των κρατών που θεωρούνται προηγμένα σε κάθε τομέα. Δυσάρεστη διαπίστωση αποτελεί η παραδοχή ότι πάνω από το ½ των ποταμών έχουν ρυπανθεί σε τέτοια έκταση, έτσι ώστε αναπόφευκτη συνέπεια είναι η συνακόλουθη ρύπανση του φυσικού περιβάλλοντος και των ζωντανών οργανισμών που ζουν μέσα σε αυτά τα πλαίσια (Choi et al., 2020).

Προχωρώντας ένα βήμα παρακάτω, η Ευρωπαϊκή Ένωση προέβη σε μία σειρά νομικών ρυθμίσεων, προκειμένου να αντιμετωπίσει τις αρνητικές συνέπειες των περιβαλλοντικών προβλημάτων. Πιο αναλυτικά, σύμφωνα με την Οδηγία 2000/60/EC, εισήχθησαν νομοθετικές διατάξεις με στόχο την με κάθε τρόπο διαφύλαξη της προστασίας του περιβάλλοντος. Αποδέκτες της συγκεκριμένης Οδηγίας ήταν φυσικά τα κράτη μέλη, τα οποία όφειλαν να εναρμονίσουν την εσωτερική τους νομοθεσία με τους Ευρωπαϊκούς κατευθυντήριους άξονες. Ωστόσο, τα κράτη έχουν τη διακριτική ευχέρεια να καθορίσουν το είδος των ενεργειών στις οποίες θα προβούν για την εξάλειψη της υδάτινης ρύπανσης (Tan et al., 2021).

Έτσι, μέσα από την ενδεδειγμένη εξέταση της κατάστασης των υδάτινων πηγών, αναδείχθηκε η γενεσιουργός αιτία της ρύπανσης των εκτάσεων που καλύπτονται από νερό. Πιο συγκεκριμένα, η ρύπανση προκαλείται από διαφορετικούς παράγοντες, ανάμεσα στους οποίους περιλαμβάνεται και η μεταφορά των ομβρίων υδάτων, τόσο σε επίπεδο εντός όσο

και εκτός του αστικού δικτύου (Yilmaz & Κορ, 2014). Είναι γνωστό ότι η χάραξη της Ευρωπαϊκής στρατηγικής πραγματοποιήθηκε με γνώμονα την εξάλειψη της ρύπανσης . Τα τελευταία χρόνια, προτάθηκε ένα πλαίσιο δράσης για την εκ νέου διαμόρφωση των υποδομών που χρησιμεύουν στον περιορισμό της υδατικής ρύπανσης από αστικές απορροές. Ωστόσο, η ανάλογη μέριμνα είναι απαραίτητο να ληφθεί σε κρατική καθώς και Ευρωπαϊκή κλίμακα. Η διαμόρφωση, δηλαδή, των διόδων απομάκρυνσης των ομβρίων ενδείκνυται να γίνει με την ίδια μέθοδο σε κάθε κράτος μέλος, προκειμένου να ασκείται ο αναγκαίος έλεγχος στην μεταφορά τους και να μην επιδρούν αρνητικά στην ποιοτική κατάσταση των υδάτινων πηγών (Shorshani et al., 2015).

Η αύξηση της υδατικής ρύπανσης από αστικές απορροές, οφείλεται σε μεγάλο βαθμό, στο γεγονός της μη έγκαιρης και ανεπαρκούς αντιμετώπισής της. Είναι ενδεικτικό, ότι η πρώτη εμφάνιση ανάλογων φαινομένων πραγματοποιήθηκε στις ΗΠΑ το έτος 1970. Παρατηρήθηκε, μεταξύ άλλων, πως η υδατική ρύπανση από αστικές απορροές, ενδέχεται να αλλοιώσει ποιοτικά την κατάσταση του νερού. Στην σύγχρονη εποχή, η έκταση της ρύπανσης έχει προσελκύσει το ενδιαφέρον της διεθνούς κοινότητας σε μη ικανοποιητική για την οριστική καταπολέμησή της έκταση. Εν συνεχεία, είναι αναγκαίο να επισημανθεί πως η ρύπανση των ομβρίων είναι δυνατόν να λάβει δύο μορφές: αφενός, έχει γίνει αντιληπτή η ρύπανση που παρατηρείται σε σημειακή μορφή και αφετέρου, η μόλυνση που εμφανίζεται με διάχυτη μορφή (diffuse source). Χαρακτηριστικά, επιβλαβή σωματίδια όπως βαρέα μέταλλα, μεταφέρονται μέσω των υπεραστικών οδών, επηρεάζοντας αρνητικά την κατάσταση του ύδατος. Απόρροια αυτής της κατάστασης είναι η βιοσυσσώρευση των ρύπων αυτών σε ζωντανούς οργανισμούς που έχουν καταναλώσει νερό από ρυπασμένες πηγές (Fallah et al., 2014).

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι να αναλυθούν με τη μέθοδο της βιβλιογραφικής ανασκόπησης μελετών από τη διεθνή βιβλιογραφία τα συστήματα συλλογής και διαχείρισης όμβριων υδάτων των αστικών οδικών δικτύων. Η εργασία δομείται σε έξι κεφάλαια, από τα οποία το πρώτο κεφάλαιο αποτελεί το κεφάλαιο της εισαγωγής, ενώ στο δεύτερο κεφάλαιο αναλύεται η ρύπανση του οδοστρώματος από τα οχήματα Το τρίτο κεφάλαιο περιγράφει τους

τρόπους διαχείρισης των πλημμυρικών φαινομένων στο οδόστρωμα, με την περιγραφή του σχετικού θεσμικού πλαισίου και τους αρμόδιους φορείς διαχείρισης των πλημμυρικών φαινομένων στο οδικό δίκτυο. Στο τέταρτο κεφάλαιο περιγράφονται οι τρόποι με τους οποίους επιτυγχάνεται η μείωση των απορροών των όμβριων υδάτων από το οδικό δίκτυο καθώς και οι τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται για αυτό το σκοπό. Στο πέμπτο κεφάλαιο αναλύονται τα βιώσιμα αστικά συστήματα συλλογής και διαχείρισης όμβριων υδάτων στα οδικά δίκτυα, ενώ το έκτο κεφάλαιο αποτελεί το κεφάλαιο των συμπερασμάτων.

2. Ρύπανση Οδοστρώματος από τα Οχήματα

2.1. Ιστορική ανάλυση της ευαισθητοποίησης στον περιβαλλοντικό τομέα

Χωρίς αμφιβολία, η ποιοτική αλλοίωση του υδάτινου περιβάλλοντος κατά το χρονικό διάστημα του έτους 1970 και έπειτα, αναδείχθηκε σε ζήτημα που έχρηζε άμεσης αντιμετώπισης από τη διεθνή κοινότητα. Ως εκ τούτου, επιστρατεύτηκαν σε αρκετές αναπτυγμένες χώρες διαθέσιμα μέσα για την αντιμετώπιση της κατάστασης. Ειδικότερα στις ΗΠΑ, πέρα από τις κατάλληλες ρυθμίσεις στο νομοθετικό και στον πολιτικό τομέα, η δράση ορισμένων οργανισμών αποδείχθηκε άκρως βοηθητική. Ως τέτοιου είδους οργανισμοί θα μπορούσαν να οριστούν οι ακόλουθοι (Czemiel Berndtsson, 2014):

- Η “Δράση για Καθαρό Νερό” (Clean Water Act), μετά την συνειδητοποίηση της διάστασης της ρύπανσης των του νερού προχώρησε το έτος 1972 στην ίδρυση της “Εθνικής Πολιτικής για το Περιβάλλον” (National Environmental Policy Act). Βασικός στόχος της εν λόγω συλλογικότητας ήταν η ενασχόληση με πάσης φύσεως δράσεις που είναι πιθανό να επηρεάσουν αρνητικά την ποιότητα των υδάτινων πόρων. Μεριμνούν, δηλαδή, για την επαρκή ενημέρωση των εμπλεκόμενων φορέων καθώς και την πρόληψη φαινομένων που είναι πρόσφορα να προκαλέσουν ρύπανση.
- Με δεδομένο το γεγονός ότι θεμελιώδης αιτία της ρύπανσης είναι η διάθεση των αποβλήτων βιομηχανικής ή αστικής προέλευσης στο νερό, το “Εθνικό Σύστημα Αντιμετώπισης και Μείωσης των Ρύπων” (National Pollutant Discharge Elimination System-NPDES) φρόντισε για τη μη ρίψη των επικίνδυνων αυτών ουσιών στους υδάτινες αποδέκτες. Επιπλέον, η ίδια οργάνωση ασχολήθηκε και με τον περιορισμό των χημικών ουσιών που προέρχονται από τη λειτουργία των αυτοκινήτων.
- Πληθώρα ανάλογων οργανώσεων επικεντρώθηκε στην καταπολέμηση των μη σημειακών πηγών ρύπανσης (NPS). Στην κατηγορία των μη σημειακών πηγών εντάσσονται οι εκροές των ομβρίων υδάτων του οδικού δικτύου.

- Η έντονη περιβαλλοντική χροιά της πολιτικής δράσης έγινε αντιληπτή μέσω της αρμονικής συνεργασίας του Αμερικανικού Υπουργείου Μεταφορών, της Αμερικανικής Πολιτικής Μεταφορών και τέλος, της Ομοσπονδιακής Διοίκησης των Αυτοκινητοδρόμων (Federal Highway Administration-FHWA). Η προστασία του περιβάλλοντος είναι δυνατόν να επιτευχθεί με την συνύπαρξη όλων των αρμόδιων οργάνων (Shorshani et al., 2015).
- Η διατήρηση της ποιοτικής κατάστασης των υδάτινων πηγών σε ένα ευνοϊκό για όλους τους οργανισμούς επίπεδο, είναι δυνατόν να διασφαλιστεί μέσω της θέσπισης ορισμένων προτύπων, τα οποία είναι αναγκαίο να τηρούνται αναφορικά με τις εκροές των εθνικών ομβρίων. Για τον σκοπό αυτό ιδρύθηκαν η “Δράση για Ασφαλές και Πόσιμο Νερό” (Safe Drinking Water Act) και η “Δράση για τη Συντήρηση και την Αποκατάσταση των Πόρων (Resource Conservation and Recovery Act) (Choi et al., 2020).

2.2. Εφαρμοστέο νομοθετικό πλαίσιο στην Ευρωπαϊκή Ένωση

Τα θεσμικά όργανα της Ευρωπαϊκής Ένωσης, πέρα από τη χάραξη κοινής πολιτικής και οικονομικής δράσης για τα συμβαλλόμενα κράτη μέλη, είναι επιφορτισμένα με το καθήκον αντιμετώπισης κάθε ζητήματος που ανακύπτει. Η προστασία του περιβάλλοντος, λοιπόν, δεν αποτελεί εξαίρεση. Επομένως, η καθιέρωση ορισμένων υποδειγμάτων, η τήρηση των οποίων είναι απαραίτητη για την αποφυγή ρύπανσης, εμπίπτει στις βασικές αρμοδιότητες των ενωσιακών οργάνων. Ακολούθως, η πιστή προσήλωση στα ενδεδειγμένα όρια ρύπων αποτελεί το εχέγγυο για τη διαφύλαξη της ποιότητας των διαθέσιμων υδάτινων πηγών (Tan et al., 2021).

Η νομοθετική δράση της Ευρωπαϊκής Ένωσης γίνεται αντιληπτή μέσω της διαμόρφωσης των λεγόμενων Οδηγιών. Από την στιγμή της έκδοσης μιας Οδηγίας, το εσωτερικό δίκαιο των κρατών μελών οφείλει να συμμορφώνεται με το περιεχόμενό της. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί ο νόμος 3199/2003 (ΦΕΚ 280Α/9-2-2003), σύμφωνα με τον οποίο

ενσωματώθηκε στην Ελληνική νομοθεσία η Ευρωπαϊκή Οδηγία 2000/60/EC. Περιεχόμενο της εν λόγω Οδηγίας ήταν η θέσπιση ορισμένων κατευθυντήριων αρχών αναφορικά με τον τρόπο οργάνωσης των υδάτινων πηγών στις εκροές των ποταμών (Fallah et al., 2014). Πιο αναλυτικά, επαφίεται στα αρμόδια όργανα των περιφερειών η εξάλειψη κάθε μορφής υδάτινης ρύπανσης, ανεξάρτητα από τους λόγους που την έχουν προκαλέσει, όπως ορίζεται στη διάταξη του άρθρου 8 του νόμου 3199/2003. Τρωτό σημείο της προαναφερθείσας ρύθμισης είναι η γενική διατύπωση των βημάτων που ενδείκνυται να ακολουθηθούν. Συνεκδοχικά, ήταν αναγκαία η θέσπιση ενός τρόπου αντιμετώπισης που θα αφορούσε και στους μη σημειακούς παράγοντες ρύπανσης που κατά κανόνα παρατηρούνται λόγω των εκροών ομβρίων (Choi et al., 2020).

Η εισαγωγή του θεσμού για την Εκτίμηση των Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων θεωρείται πρωταρχικής σημασίας αφενός για την έγκαιρη πρόβλεψη και αφετέρου, για την κατάστρωση του σχεδίου αντιμετώπισης της περιβαλλοντικής ρύπανσης. Με αυτόν τον τρόπο καθιερώθηκε ο κανόνας της έρευνας των περιβαλλοντικών συνεπειών κάθε φορά που απαιτείται η εκπόνηση μιας κατασκευής (Yilmaz & Κορ, 2014). Σε επίπεδο Ευρωπαϊκής Ένωσης, οι προαναφερθείσες κατευθυντήριες αρχές πήραν την μορφή Οδηγιών και συγκεκριμένα, των Οδηγιών 84/630/ΕΟΚ και 85/337/ΕΟΚ. Στην Ελληνική νομοθεσία οι Οδηγίες περιβλήθηκαν με νομοθετική ισχύ και πιο συγκεκριμένα, με τον νόμο 1650/86. Η περαιτέρω ανάλυση των διατάξεων του εν λόγω νόμου επιτεύχθηκε με τις Κ.Υ.Α. 69269/5387/1990 και 75308/5512/1990. Σύμφωνα, λοιπόν, με τις διατάξεις του νόμου 1650/86, ρυθμίζονται τα ακόλουθα ζητήματα (Shorshani et al., 2015):

- Καθιερώνονται τόσο τα κατώτατα όσο και τα ανώτατα αποδεκτά όρια των επιβλαβών ουσιών που περιέχονται στα απόβλητα, ενώ παράλληλα προτείνονται μέθοδοι πρόσφορες και κατάλληλες να εμποδίσουν την ανάπτυξη της ρύπανσης.
- Εισάγονται κριτήρια που συνδράμουν στην κατανόηση της κατάστασης των υδάτινων πηγών, με γνώμονα τα χαρακτηριστικά της βιοκοινότητας που ζει κοντά σε αυτές, καθώς και τις ιδιότητες του φυσικού αποδέκτη.

- Θεσπίζεται η διαμόρφωση ενός συστήματος αρμόδιου να ελέγχει την κατάσταση του νερού, έτσι ώστε εάν εντοπιστεί κάποια επιβλαβή ουσία, να ληφθούν τα απαραίτητα μέτρα.
- Ρυθμίζεται η συνεχής εποπτεία των δικτύων μεταφοράς αποβλήτων με στόχο να διασφαλίζεται η αχώλυτη λειτουργία τους.
- Ιδιαίτερη προσοχή δίνεται στη διαχείριση όχι μόνο των υδάτινων πηγών, αλλά και των χερσαίων. Δεν πρέπει να λησμονεί κανείς, φυσικά, την φροντίδα που απαιτείται και για τις τοποθεσίες που συνδυάζουν τόσο το υδάτινο όσο και το χερσαίο στοιχείο (Hammad et al., 2019).

Σε αυτό το σημείο είναι αναγκαίο να επισημανθεί πως στα πλαίσια των οργανωμένων κοινωνιών, δικλείδα ασφαλείας για την υποβάθμιση του περιβάλλοντος, είναι η συντονισμένη δράση των εμπλεκόμενων φορέων, τόσο σε κρατικό όσο και σε Ευρωπαϊκό επίπεδο. Ως εκ τούτου, με βάση την απόφαση 1692/96/EC του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου, τέθηκε ο ακρογωνιαίος λίθος για την θεμελίωση ενός δικτύου μεταφορών που θα είχε αντανάκλαση σε όλα τα κράτη της Ευρώπης. Με άλλα λόγια, προτάθηκε η συντέλεση ενός Ευρωπαϊκού συστήματος διακίνησης προϊόντων το οποίο θα βασιζόταν στην κατάλληλη δημιουργία κάθε υποδομής (λ.χ. λιμένες, αερολιμένες, σιδηρόδρομοι κ.α.). Πέρα από την επίτευξη κοινωνικών και οικονομικών επιδιώξεων, εύκολα διαπιστώνει κανείς πως στο επίκεντρο τίθεται και η εκπλήρωση περιβαλλοντικών σχεδίων. Η διευκόλυνση των μεταφορών σε κάθε κράτος της Ευρωπαϊκής Ένωσης ανεξαιρέτως, ενδείκνυται να πραγματοποιηθεί με τρόπο φιλικό προς το περιβάλλον. Η ανακατασκευή της οδικής σύνδεσης των επιμέρους κρατών είναι πιθανό να αποτελέσει εστία ρύπανσης για τις υδάτινες πηγές εξαιτίας των εκροών των ομβρίων. Επομένως, κρίνεται αναγκαίο να ληφθεί η απαραίτητη μέριμνα για την αποφυγή εμφάνισης τέτοιων φαινομένων.

Προχωρώντας ένα βήμα παρακάτω, η πρόληψη της υδάτινης ρύπανσης δύναται να επιτευχθεί μέσω της εκ των προτέρων διερεύνησης των περιβαλλοντικών συνθηκών στα πλαίσια των οποίων θα διαμορφωθεί το καινούριο οδικό δίκτυο. Όπως ορίζεται στην

απόφαση 1692/96/ΕΕ και ειδικότερα στη διάταξη του άρθρου 8 αυτής, είναι επιβεβλημένη η επιμελής εκτέλεση Μελέτης Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων (Μ.Π.Ε.), όπως επίσης και η εκτέλεση Εκτίμησης Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων (Ε.Π.Ε.). Απαραίτητη προϋπόθεση για την επιθυμητή έκβαση της διενεργηθείσας μελέτης είναι η σε βάθος ανάλυση των ιδιαίτερων ιδιοτήτων των ομβρίων υδάτων. Τρωτό σημείο της διαδικασίας αυτής είναι η ανυπαρξία προυπάρχουσων σχετικών αναφορών, δεδομένου ότι η ανάγκη διαχείρισης του εν λόγω ζητήματος εμφανίστηκε σχετικά πρόσφατα. Επιπλέον, τα κριτήρια που τίθενται από τις Μ.Π.Ε. και Ε.Π.Ε. στερούνται ειδικότητας και συνεπώς, δεν δύνανται να εφαρμοστούν σε κάθε επιμέρους ανάλυση των ομβρίων υδάτων (Choi et al., 2020).

Είναι ενδεικτικό πως στην περίπτωση της διαμόρφωσης της Εγνατίας Οδού Α.Ε., και πιο αναλυτικά στις Οδηγίες Σύνταξης Μελετών Έργων Οδοποιίας, αναφέρεται πως απαιτείται όχι μόνο η απομάκρυνση του νερού από την επιφάνεια του δρόμου αλλά παράλληλα, η κατάληξη αυτής της ποσότητας ύδατος σε τοποθεσία που δεν υποβαθμίζει τη βιοποικιλότητα. Ωστόσο, στο σώμα των Οδηγιών σημειώνεται πως αυτές δεν αποτελούν την μόνη οδό διευθέτησης του ζητήματος. Υπό την έννοια αυτή, εύκολα διαπιστώνει κανείς, πως δίνονται ορισμένες κατευθυντήριες αρχές, οι οποίες ενδείκνυται να ληφθούν ως έναυσμα για την περαιτέρω έρευνα και ανάλυση του ζητήματος (Tan et al., 2021).

2.3.Επίδραση των Απορροών Ομβρίων Υδάτων από το Οδικό Δίκτυο στους Υδάτινους Αποδέκτες

Είναι γνωστό πως οι ουσίες που περιέχονται στα όμβρια ύδατα που προέρχονται από το οδικό δίκτυο είναι δυνατόν να είναι είτε επιβλαβείς, είτε θετικές για το περιβάλλον. Στην περίπτωση των επικίνδυνων συστατικών, τα τελευταία είναι ικανά να αλλοιώσουν ποιοτικά το νερό που βρίσκεται τόσο κάτω από το έδαφος, όσο και πάνω σε αυτό. Αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας είναι η διαμόρφωση μη σημειακών ή αντίστοιχα σημειακών μορφών ρύπανσης του ύδατος (Fallah et al., 2014).

Πιο συγκεκριμένα, η βροχόπτωση είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με την προαναφερθείσα κατάσταση. Το νερό της βροχής, με άλλα λόγια, μεταφέρει τους ατμοσφαιρικούς ρύπους που

βρίσκονται είτε εντός, είτε εκτός της υπεραστικής οδού. Το νερό αυτό περιέχει διάφορα ρυπογόνα στοιχεία όπως, για παράδειγμα, φυτοφάρμακα. Την στιγμή που το νερό έρχεται σε επαφή με το οδικό δίκτυο, τα επιβλαβή στοιχεία αυξάνονται σημαντικά, δεδομένου ότι στην επιφάνεια του εδάφους συχνά ανευρίσκονται ρυπογόνες ουσίες που προκύπτουν από την ίδια την υλική υποδομή του δικτύου αλλά και από τα προϊόντα που μεταφέρονται στην επιφάνειά του. Ως εκ τούτου, το νερό που εν τέλει διατίθεται στους υδάτινους αποδέκτες αλλοιώνεται ουσιαστικά, διότι περιέχει μια σειρά από βλαβερές ουσίες (λ.χ. οι ουσίες που προκύπτουν από την καύση των υδρογονανθράκων ή από τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για τη δημιουργία του οδικού δικτύου) (Choi et al., 2020).

Έτσι, το νερό της βροχής, ενώ αρχικά είναι απαλλαγμένο από κάθε είδους ρυπαντική ουσία, επηρεάζεται από τους ατμοσφαιρικούς ρύπους και τα λοιπά στοιχεία όπως αναλύθηκαν παραπάνω, με αποτέλεσμα να καταλήγει ρυπασμένο στους υδάτινους πόρους. Χαρακτηριστικά θα μπορούσαν να αναφερθούν ορισμένα σωματίδια τα οποία καθιστούν επικίνδυνη την κατανάλωση νερού από τις πηγές που περιέχουν ανάλογα στοιχεία. Ως τέτοια θα μπορούσαν να νοηθούν: το χρώμιο, το νικέλιο, το βάριο, το θείο κ.α.. Εξέχουσα θέση στην κατηγορία των επιβλαβών ουσιών κατέχουν ο ψευδάργυρος και ο μόλυβδος, οι οποίοι απαντώνται συχνότερα κατά την ποιοτική ανάλυση του ύδατος (Shorshani et al., 2015).

Εν συνεχεία, η ενδεδειγμένη εξέταση των ομβρίων υδάτων του υπεραστικού δικτύου, έχει καταδείξει πως οι συχνότερα εμφανιζόμενοι ρύποι που παρατηρούνται στην σύσταση του νερού είναι δυνατόν να συνοψιστούν ως ακολούθως (Tan et al., 2021):

- **Οργανικοί Ρύποι:** Οι αστικές απορροές ομβρίων είναι ένας βασικός μηχανισμός μεταφοράς βιοδιασπάσιμων οργανικών ρύπων στους υδάτινους αποδέκτες που έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση των συγκεντρώσεων διαλυμένου οξυγόνου (DO) σε αυτούς, φαινόμενο γνωστό ως αποξυγόνωση. Συνήθως οι οργανικοί αυτοί ρύποι μετριούνται σε όρους συγκέντρωσης βιοχημικά απαιτούμενου οξυγόνου (BOD) ή χημικά απαιτούμενου οξυγόνου (COD). Η προέλευση των ρύπων από όμβρια ύδατα συναντάται από την ρύπανση από την έκπλυση του οδικού δικτύου και χώρων

στάθμευσης, συνεργειών και χώρων πρατηρίων και από τα νερά πλύσης των πλυντηρίων αυτοκινήτων.

Ρύπανση από διάφορες χημικές προσμίξεις που παρασύρονται με τα όμβρια

- **Στερεά σωματίδια:** τα συγκεκριμένα σωματίδια αποτελούνται στο μεγαλύτερο μέρος τους από σκόνη και σκουπίδια. Εμφανίζονται με λεπτή μορφή και ανευρίσκονται κατά κύριο λόγο στην επιφάνεια του υπεραστικού δικτύου.. Το πρόβλημα εντοπίζεται στην προσρόφηση οργανικών και ανόργανων ουσιών στα αιωρούμενα στερεά και την μεταφορά τους μέσω της διάθεσης των ομβρίων στους υδάτινους αποδέκτες προκαλώντας φαινόμενα αποξυγόνωσης, ευτροφισμού ή ακόμη και τοξικότητας.
- **Βαρέα μέταλλα:** στην συγκεκριμένη κατηγορία εντάσσονται στοιχεία όπως το μαγγάνιο, ο μόλυβδος, το καίσιο, το νικέλιο κ.α.. Ως γενεσιουργοί λόγοι των στοιχείων αυτών παρουσιάζονται διάφορες δραστηριότητες που λαμβάνουν χώρα στην επιφάνεια του οδικού δικτύου. Για παράδειγμα, η εκπομπή ρύπων των οχημάτων, όπως επίσης και η σταδιακή διάβρωση του εδάφους λόγω της συχνής μετακίνησης των αυτοκινήτων.

Ειδικά για την περίπτωση του μολύβδου και του καδμίου, έχει παρατηρηθεί ότι αποτελούν την κυριότερη αιτία ρύπανσης των πηγών νερού. Συμπερασματικά, πολλές επιχειρήσεις κατασκευής οχημάτων έχουν αποκλείσει το κάδμιο από την διαδικασία παραγωγής. Τα αρμόδια Ευρωπαϊκά όργανα έχουν καθορίσει τις αποδεκτές τιμές καδμίου σε 5 $\mu\text{g/l}$ για την περίπτωση του πόσιμου νερού. Από την άλλη πλευρά, σχετικά με τον μόλυβδο, αξίζει να παρατηρηθεί πως παρά το γεγονός ότι δεν διαλύεται στο υγρό στοιχείο, εντούτοις η τοξικότητα του είναι σημαντική (Liu et al., 2016).

Επιπροσθέτως, οι αρνητικές συνέπειες από τη χρήση του ψευδαργύρου αλλά και του χαλκού δεν είναι αμελητέες. Η εκτεταμένη χρησιμοποίησή τους στα κέντρα παραγωγής οχημάτων, σε συνδυασμό με το υψηλό επίπεδο διαλυτότητας που εμφανίζουν,

αποτελούν καθοριστικούς παράγοντες για την ρύπανση των υδάτινων αποδεκτών και των οικοσυστημάτων. Αφενός, αξίζει να σημειωθεί πως ο ψευδάργυρος είναι δυνατόν να ανευρεθεί στα αντιψυκτικά , όπως επίσης και στους ρύπους που προέρχονται από την μετακίνηση των οχημάτων.

Ακολούθως, τις πρώτες θέσεις αναφορικά με την επικινδυνότητα των στοιχείων, καταλαμβάνουν ο χαλκός, ο ψευδάργυρος και ο μόλυβδος. Μάλιστα, υψηλό ποσοστό εμφάνισής τους σημειώνεται ιδιαίτερα κατά τη διάρκεια του πρώτου μισάωρου του φαινομένου της βροχής (Hammad et al., 2019).

Αντιθέτως, ο σίδηρος είναι δυνατόν να ανευρεθεί σε περιπτώσεις τεχνικής αλλοίωσης των οχημάτων, η οποία φυσικά προκαλείται από την συνεχόμενη χρήση τους. Τόσο η μεγάλη συγκέντρωση στα άλατα που βρίσκονται στην επιφάνεια του οδικού δικτύου, όσο και η χημική του δομή, αποτελούν απειλητικούς παράγοντες που επιδρούν αρνητικά στην ποιοτική κατάσταση του νερού (Fallah et al., 2014).

Εν συνεχεία, η σταδιακή αποδυνάμωση των φρένων εξαιτίας της εκτεταμένης χρήσης τους, είναι δυνατόν να έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή στοιχείων όπως το καίσιο και το βάριο. Επιπλέον, η εκτεταμένη χρησιμοποίηση των ελαστικών ενδέχεται να προκαλέσει την εκροή ουσιών, όπως το αντιμόνιο. Η ποσότητα μαγγανίου και νικελίου που εμφανίζεται συχνά στις υδάτινες πηγές, προκαλείται από τα καύσιμα που χρησιμοποιούνται για την κίνηση των οχημάτων. Ωστόσο, γίνεται αντιληπτό, πως οι προαναφερθείσες κατηγορίες ευθύνονται για μικρότερου μεγέθους αρνητικές συνέπειες στην ποιότητα του νερού (Choi et al., 2020).

- **Υδρογονάνθρακες:** στην εν λόγω κατηγορία εντάσσονται οι υδρογονάνθρακες πετροχημικής φύσεως, ανάμεσα στους οποίους κυριαρχούν τα καύσιμα όπως το πετρέλαιο και η βενζίνη. Βασικό χαρακτηριστικό που τους διαφοροποιεί από το νερό, είναι ότι δεν έχουν τη δυνατότητα να διαλύονται ολοκληρωτικά κάθε φορά που έρχονται σε επαφή με κάποιο άλλο υγρό. Έτσι, γίνονται αντιληπτοί στην επιφάνεια του νερού, καθώς εμφανίζονται με την μορφή μικρών κηλίδων. Εντούτοις, υπάρχουν

και οι υδρογονάνθρακες που προκύπτουν από καύσιμα με πηχτή μορφή. Σε αυτήν την περίπτωση, λοιπόν, εμφανίζονται πηχτές κηλίδες, οι οποίες δεν μπορούν να διαλυθούν με ευκολία στην επαφή τους με το νερό (Liu et al., 2016).

- **Θρεπτικά:** Οι πηγές αζώτου και φωσφόρου στις αστικές απορροές ομβρίων έχουν φυσική (ατμοσφαιρικές αποθέσεις) και ανθρωπογενή προέλευση (χημικά λιπάσματα, λύματα, κ.ά.) Το άζωτο (N) και ο φώσφορος (P) συναντώνται σε διαλυμένη και σε σωματιδιακή μορφή, προσροφημένα στους εδαφικούς κόκκους και στην οργανική ύλη που μεταφέρονται ως ίζημα από τις απορροές ομβρίων. Η διάθεση τους στους υδάτινους αποδέκτες μπορεί να προκαλέσει φαινόμενα ευτροφισμού.
- **Άλατα:** είναι αδιαμφισβήτητο, πως η διαχείριση των χιονοπτώσεων των χειμερινών μηνών απαιτεί τη λήψη δραστικών μέτρων, ανάμεσα στα οποία πρωταρχική θέση κατέχει η ρίψη άλατος. Έτσι, μετά το πέρας αυτής της διαδικασίας αυξάνονται τα ποσοστά θείου, ασβεστίου και νατρίου στους υδάτινους πόρους. Μολονότι η παρουσία τέτοιων στοιχείων δεν συνιστά απειλητική συνθήκη για το οικοσύστημα, εντούτοις, ενδέχεται να προκαλέσει βλάβη στον ανθρώπινο οργανισμό. Είναι αναγκαίο να επισημανθεί πως απαιτείται η χρήση του άλατος να πραγματοποιείται με την απαιτούμενη ενσυναίσθηση. Με άλλα λόγια, να χρησιμοποιείται η ποσότητα εκείνη που θεωρείται πρόσφορη και κατάλληλη για την εξασφάλιση της ασφαλούς μετακίνησης προϊόντων και ανθρώπων, χωρίς να γίνεται κατάχρηση.

Τα επιφανειακά ύδατα, λοιπόν, εμφανίζουν μεγαλύτερη αντοχή αναφορικά με την ρύπανση των αλάτων. Ουσιωδώς διαφορετική παρουσιάζεται η κατάσταση στην περίπτωση των υπόγειων υδάτων που ανανεώνονται με μικρότερο ρυθμό και το πρόβλημα της υφαλμύρισης είναι εντονότερο

Δεν πρέπει να λησμονεί κανείς φυσικά, πως η ίδια η σύσταση του άλατος του καλίου είναι φιλική προς το περιβάλλον, διότι αποτελείται από στοιχεία που μπορούν να διαλυθούν χωρίς να προκαλέσουν βλάβη του οικοσυστήματος. Από την άλλη πλευρά, στοιχεία όπως το χλωριούχο νάτριο, λόγω της μεγάλης ποσότητας χλωρίου και νατρίου

που περιέχουν, είναι πιθανό να υποβαθμίσουν ποιοτικά τους φυσικούς αποδέκτες αλλά και την κατάσταση του οδικού δικτύου. Με άλλα λόγια, έχουν τη δυνατότητα να καταστρέψουν την εξωτερική επιφάνεια του οδοστρώματος (Shorshani et al., 2015).

Εάν επιχειρήσει κανείς μια πιο λεπτομερή εξέταση των συνεπειών της ύπαρξης φωσφόρου και αμμωνίας στο νερό, θα οδηγηθεί στο εξής συμπέρασμα: οι εν λόγω ουσίες δύνανται να προκαλέσουν τη δημιουργία διαφόρων φυτών που αναπτύσσονται σε υδάτινο περιβάλλον. Τα φυτά αυτά (άλγη) καθιστούν το νερό της πηγή στην οποία ζουν και εξελίσσονται ακατάλληλο για κατανάλωση. Ωστόσο, ενδείκνυται να παρατηρηθεί πως η μεγαλύτερη ποσότητα αυτών των ουσιών αφομοιώνεται από διάφορα αιωρούμενα στοιχεία.

- **Επιβλαβείς ουσίες:** η κατάληξη ουσιών στους υδάτινους αποδέκτες που θεωρούνται ικανές να επηρεάσουν κατά τρόπο καταστρεπτικό την ποιότητα τους, ενδέχεται να προέλθει από τη διάχυση ή διαρροή υλικών που μετακινούνται στο οδικό δίκτυο. Χαρακτηριστικά θα μπορούσαν να αναφερθούν οι περιπτώσεις αυτοκινητιστικού ατυχήματος, αλλά και διακίνησης αγαθών χωρίς οι υπεύθυνοι να μένουν πιστοί στα Πρωτόκολλα ασφαλείας που έχουν θεσπιστεί. Οι φορείς της Ευρωπαϊκής Ένωσης μερίμνησαν για την ρύθμιση του εν λόγω ζητήματος, με την έκδοση της Οδηγίας 94/55/EC.

Χωρίς αμφιβολία, η διαμόρφωση και κατ' επέκταση η διατήρηση της καλής κατάστασης του οδικού δικτύου στοχεύει στην κίνηση της αγοράς, στην εξυπηρέτηση οικονομικών συμφερόντων και εν κατακλείδι, στην παροχή κέρδους. Ωστόσο, ορισμένα προϊόντα που λαμβάνονται ως πρώτες ύλες για την βιομηχανική παραγωγή, θεωρούνται άκρως επιβλαβή για το φυσικό περιβάλλον, τους ζωντανούς οργανισμούς καθώς και για τη διατήρηση της εμπιστοσύνης στην ισχύ της έννομης τάξης (Choi et al., 2020).

Είναι ενδεικτικό ότι πάνω από 3.000 πρώτες ύλες καθώς και τα προϊόντα που προέρχονται από αυτές, αντιμετωπίζονται από τη διεθνή κοινότητα ως άκρως

απειλητικές για την υγεία και το οικοσύστημα κατά τη διάρκεια της διακίνησής τους. Οι επιβλαβείς ουσίες αναφέρονται σε πολλές κατηγορίες, ανάμεσα στις οποίες κυριαρχούν οι εξής: εύφλεκτες, ραδιενεργές, τοξικές, ασφυξιογόνες κ.α..

Πιο αναλυτικά, μόνο την πενταετία από το έτος 1999 έως το 2004, η διακίνηση επιβλαβών προϊόντων κάλυψε κατά προσέγγιση τα 70 εκατομμύρια τονοχιλιόμετρα. Η έκταση αυτή είναι ιδιαιτέρως μεγάλη, αν αναλογιστεί κανείς το γεγονός πως το 5% των συνολικών διακινήσεων αγαθών που πραγματοποιούνται στην Ηπειρωτική Ευρώπη άγγιζε τα 1,4 τονοχιλιόμετρα ανά έτος. Είναι ενδεικτικό κατά τη διάρκεια του 2004 πάνω από το ½ των τονοχιλιομέτρων που έχουν συντελεστεί, αφορούσαν στην μετακίνηση προϊόντων που διακρίνονταν για την υψηλή περιεκτικότητά τους σε επικίνδυνες ουσίες. Επιπροσθέτως, περίπου το 1/10 των συνολικών μεταφορών σχετιζόταν με αέριες ουσίες, ενώ ένα επιπλέον 1/10 του συνόλου αφορούσε σε διαβρωτικές ουσίες. Για παράδειγμα, το έτος 2004 η μετακίνηση εύφλεκτων υγρών ξεπέρασε το ½ των συνολικών μεταφορών προϊόντων. Αντιθέτως, κάτω από το 5% των διακινούμενων αγαθών αναφέρεται σε τοξικές, ρυπαντικές και οξειδωτικές ύλες (Tan et al., 2021).

Μολονότι η πρόκληση αυτοκινητιστικών ατυχημάτων δεν αποτελεί συχνό φαινόμενο, εντούτοις ευθύνονται για τη δημιουργία μεγάλης έντασης ζημιών, τόσο από περιβαλλοντική όσο και από οικονομική χροιά. Η ύπαρξη επιβλαβών ουσιών στα αγαθά που διακινούνται καθιστούν την ύπαρξη ενός τέτοιου ατυχήματος μία σοβαρή περιβαλλοντική απειλή. Για παράδειγμα, ενδέχεται από τις ραδιενεργές ουσίες να προκληθούν βλάβες σε φυτικούς και ζωικούς οργανισμούς, ενώ άξια αναφοράς είναι και η συνακόλουθη ρύπανση των υδάτινων πηγών (Fallah et al., 2014).

Όπως προκύπτει από έρευνες που διενεργήθηκαν κατά το διάστημα από το έτος 1999 έως το έτος 2003 στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής, παρατηρείται ότι η πρόκληση θανάτου λόγω αυτοκινητιστικών ατυχημάτων είναι ελάχιστη. Ειδικότερα, σε σύνολο 7.700 πολιτών, ενδέχεται να τραυματιστεί μόνο ένας πολίτης. Στον αντίποδα, η

κατάσταση διαφοροποιείται εάν το αντικείμενο αναφοράς είναι η διενέργεια διακίνησης αγαθών με επιβλαβείς ουσίες. Πιο αναλυτικά, ένα τέτοιο ενδεχόμενο είναι δυνατόν να εμφανιστεί σε έναν πολίτη ανά σύνολο 23.350.000 (Shorshani et al., 2015).

Η έκταση της προκληθείσας, κάθε φορά, ζημίας λόγω συντριβής οχημάτων τα οποία μεταφέρουν προϊόντα με βλαβερές ουσίες ενδέχεται να λάβει μικρή, μεσαία ακόμα και μεγάλη διάσταση, όπως άλλωστε διαφαίνεται και από τον Πίνακα 1. Ειδικότερες λεπτομέρειες αναφορικά με το εκάστοτε συμβάν, όπως, για παράδειγμα η ανάλυση της εκροής ουσιών σε ποιοτικό και χρονικό επίπεδο. Για παράδειγμα, σύμφωνα με τον Πίνακα 1, η διαρροή υγραερίου, εάν εμφανιστεί σε μικρή ή μεσαία έκταση είναι δυνατόν να οδηγήσει σε πίδακα φωτιάς, όπως επίσης και σε έκρηξη αερίου νέφους.

Πίνακας 1. Επικίνδυνες ουσίες από οδικά ατυχήματα. Πηγή: (Βαγιόκας, 2008)

Ουσία	Μικρή και μεσαία διαρροή	Μεγάλη διαρροή
Ακρυονιτρίλιο	Διαρροή τοξικών, λίμνη φωτιάς	Διαρροή τοξικών, λίμνη φωτιάς
Υδροχλωρικό οξύ	Διαρροή τοξικών, λίμνη φωτιάς	Διαρροή τοξικών, λίμνη φωτιάς
Αμμωνία	Διαρροή τοξικών	Διαρροή τοξικών
Χλώριο	Διαρροή τοξικών	Διαρροή τοξικών
Υγρά καύσιμα	Λίμνη φωτιάς	Λίμνη φωτιάς
Υγραέριο	Πίδακας φωτιάς, φωτιά αερίου νέφους, έκρηξη αερίου νέφους	Σφαίρα φωτιάς, φωτιά αερίου νέφους, έκρηξη αερίου νέφους
Αιθυλενοξειδίο	Διαρροή τοξικών, λίμνη φωτιάς	Διαρροή τοξικών, λίμνη φωτιάς

Από την άλλη πλευρά, εάν λάβει τη μεγαλύτερη δυνατή διάσταση είναι πιθανό να προκαλέσει σφαίρα φωτιάς και έκρηξη αερίου νέφους με ακόμα μεγαλύτερες καταστροφικές συνέπειες. Στην πρόκληση φωτιάς οδηγούν επίσης, οι διαρροές υδροχλωρικού οξέος και υγρών καυσίμων. Αντιθέτως, η έγχυση τόσο αμμωνίας όσο και χλωρίου έχουν σαν αποτέλεσμα τη διαρροή τοξικών ουσιών στο περιβάλλον. Σύμφωνα με τα δεδομένα που εξάγονται από τον Πίνακα 2, μία διαρροή μικρού μεγέθους καλύπτει ποσότητα από 2.000 έως 6.000 kg, ενώ η αντίστοιχη εμφάνιση σε

μεγάλη κλίμακα αγγίζει 14.000 και δύναται να φτάσει τα 20.000 kg. Τέλος, μία ενδεχόμενη διαρροή μεσαίου μεγέθους αντιστοιχεί κατά προσέγγιση σε 6.000 έως 14.000 kg.

Προχωρώντας ένα βήμα παρακάτω, στον Πίνακα 3, δίνεται μια ολοκληρωμένη εικόνα για τις κατηγορίες των ρυπογόνων ουσιών που παρατηρούνται συχνότερα στους φυσικούς αποδέκτες των οδικών δικτύων. Ακόμη, καταγράφονται οι κατηγορίες από τις οποίες προέρχονται. Πιο αναλυτικά, ο φώσφορος και το άζωτο προκύπτουν από τη χρησιμοποίηση ουσιών που βοηθούν στην ανάπτυξη και στην παραγωγικότητα των φυτικών οργανισμών (λίπασμα). Επιπλέον, η εκροή ψευδαργύρου προκαλείται από την σταδιακή αλλοίωση μερών των αυτοκινήτων, όπως είναι λ.χ. τα φρένα. Εν συνεχεία, είναι πιθανό να παρατηρηθεί έγχυση μαγγανίου εξαιτίας της αδιάκοπης κίνησης της μηχανής, ενώ οι υψηλές συγκεντρώσεις βρωμίου οφείλονται σε μεγάλο βαθμό στις εξατμίσεις των οχημάτων. Δεν πρέπει φυσικά να λησμονεί κανείς την ύπαρξη κάθε είδους σωματιδίων στην επιφάνεια του οδοστρώματος, τα οποία είναι πιθανόν να προέρχονται από σκόνη ή και σκουπίδια. Εξίσου σημαντική παρουσιάζεται η παρουσία παθογόνων βακτηριδίων στο οδικό δίκτυο, καθώς και άλλων ρυπογόνων ουσιών.

Ακολούθως, δυσάρεστη διαπίστωση αποτελεί το γεγονός ότι τόσο η εγχώρια όσο και η παγκόσμια επιστημονική κοινότητα δεν έχει ασχοληθεί σε ικανοποιητικό βαθμό με την ποιοτική ανάλυση των ομβρίων υδάτων που προέρχονται από την μεταφορά αερίων στο οδικό δίκτυο. Αρωγός στην λεπτομερέστερη μελέτη του εν λόγω ζητήματος στάθηκε η διενέργεια ερευνών που έλαβαν χώρα στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής. Η συγκεκριμένη έρευνα αποτέλεσε το έναυσμα το έτος 1990 για την περαιτέρω εξέταση των χαρακτηριστικών των ρυπογόνων ουσιών από τους Driscoll et al.. Τα στοιχεία που συγκεντρώθηκαν από τις έρευνες περιέχονται στον Πίνακα 4.

Πίνακας 2. Χαρακτηριστικά και κατηγορίες διαρροών Πηγή: (Βαγιόκας, 2008)

Κατηγορία διαρροής	Ποσότητα (kg)	Διάρκεια (min)	Ρυθμός (kg/sec)	Διάμετρος οπής (mm)
Μικρή	2.000 - 6.000	60 - 30	0,56 - 3,33	6,5 - 15,8
Μεσαία	6.000 - 14.000	30 - 15	3,33 - 15,56	15,8 - 34,2
Μεγάλη	14.000 - 20.000	Στιγμιαία	-	-

Πίνακας 3. Ρύποι απορροών του οδοστρώματος και πηγές προέλευσης. Πηγή: (East – West Gateway Coordinating Council, 2000)

Ρύπος	Πηγή προέλευσης
Στερεά σωματίδια	Σκόνη και σκουπίδια από την κυκλοφορία, σκόνη από την περιοχή διέλευσης της υπεραστικής οδού, χρήση αποπαγωγικών μέσων.
Καουτσούκ	Φθορά ελαστικών οχημάτων.
Αμίαντος	Φθορά συμπλέκτη και φρένων.
Άζωτο και φώσφορος	Χρήση λιπασμάτων και φυτοφαρμάκων πλησίον της οδού.
Μόλυβδος	Εξάτμιση αυτοκινήτων, φθορά ελαστικών, λάδια οχημάτων.
Καίσιο	Σύστημα πέδησης
Ψευδάργυρος	Φθορές των επισώτρων, των φρένων, εκπομπές καυσαερίων, χρήση αποπαγωγικών αλάτων.
Σίδηρος	Σκουριά αμαξώματος οχημάτων, μεταλλικές γέφυρες και μεταλλικά προστατευτικά κιγκλιδώματα.
Χαλκός	Ρουλεμάν, κινούμενα μέρη μηχανών, σύστημα πέδησης.
Κάδμιο	Φθορά ελαστικών.
Χρώμιο	Κινούμενα μέρη μηχανών, σύστημα πέδησης
Βάριο	Σύστημα πέδησης
Νικέλιο	Καύσιμα diesel και βενζίνη, λιπαντικά μηχανής, σύστημα πέδησης, υλικά επίστρωσης οδοστρώματος.
Αντιμόνιο	Φθορά ελαστικών οχημάτων.
Μαγγάνιο	Κινούμενα μέρη μηχανών.
Νάτριο και ασβέστιο	Αποπαγωγικά υλικά.
Άλατα	Ρίψη άλατος.
Θειικά άλατα	Καύσιμα και αποπαγωγικά υλικά.
Βρώμιο	Εξατμίσεις οχημάτων.
Παθογόνα βακτηρίδια	Περιπτώματα ζώων πουλιών, απώλειες περιπτώματων από φορτηγά που μεταφέρουν ζώα.

Ωστόσο είναι επιβεβλημένο να επισημανθεί πως οι αναφερόμενες στον συγκεκριμένο πίνακα τιμές δεν αναλογούν στα κατώτατα και στα ανώτατα αποδεκτά όρια. Αντιθέτως, προβάλλουν την ποσότητα των ρυπογόνων ουσιών σε μέσες τιμές και αντιστοιχούν στις τοποθεσίες όπου

διενεργήθηκε ο εποπτικός έλεγχος. Για παράδειγμα, ο ολικός φώσφορος συγκεντρώνεται κατά 0,113 έως 0,998 mg/l, ενώ ο ολικός οργανικός άνθρακας από 24 έως 77 m/l. Επιπλέον, στην κατηγορία των μετάλλων, ο ολικός ψευδάργυρος λαμβάνει κατά προσέγγιση 0,056 έως 0,929 mg/l.

Η έναρξη του έτους 1980 σηματοδότησε την έναρξη για την πραγματοποίηση ερευνών στο έδαφος των Ηνωμένων Πολιτειών της Αμερικής, οι οποίες επικεντρώθηκαν σε 11 πολιτείες. Ειδικότερα, στον Πίνακα 5 αναφέρονται τα πορίσματα, τα οποία συγκεντρώθηκαν με σημείο αναφοράς τη διέλευση 30.000 οχημάτων ανά ημέρα.

Πίνακας 4. Συγκέντρωση ρύπων των απορροών όμβριων οδών. Πηγή: (Yannopoulos et al., 2004)

Ρύπος	Συγκέντρωση (mg/l)	Ετήσιο φορτίο ρύπων ανά μονάδα επιφάνειας (kg/ha/yr)
Στερεά		
Αιωρούμενα	45,0 – 798,0	314,0 – 11862,0
Διαλυμένα		148
Θρεπτικές ουσίες		
Ολική αμμωνία		1,03 – 4,6
Νιτρικά και νιτρώδη	0,15 – 1,636	0,8 – 8,0
Ολικό άζωτο Kjeldahl	0,335 – 55,0	1,66 – 31,95
Ολικό άζωτο		9,80
Ολικός φώσφορος	0,113 – 0,998	0,6 – 8,23
Ολικός οργανικός άνθρακας	24,0 – 77,0	31,3 – 342,1
Διάφορα		
BOD ₅	12,7 – 37,0	30,6 – 164,0
COD	14,7 – 272,0	128,0 – 3868,0
PAHs		0,005 - 0,018
Χλωρίδια		4,63 - 1.344,0
Μέταλλα		
Ολικός ψευδάργυρος	0,056 – 0,929	0,22 – 10,4
Ολικό κάδμιο		0,0072 - 0,037
Ολικό νικέλιο		0,07
Ολικός χαλκός	0,022 – 7,033	0,03 – 4,67
Ολικός σίδηρος	2,429 – 10,30	4,37 – 28,81
Ολικός μόλυβδος	0,073 – 1,78	0,08 – 21,2
Ολικό χρώμιο		0,012 - 0,10

Πιο συγκεκριμένα, η συγκέντρωση ολικών αιωρούμενων στερεών βρίσκεται στην πρώτη θέση, καταλαμβάνοντας 41 mg/l κατά το πέρας λιγότερων από 30.000 οχημάτων την ημέρα. Στην περίπτωση που το ίδιο υλικό αφορά στη διέλευση πάνω από 30.000 οχημάτων την ημέρα, ο ίδιος αριθμός αυξάνεται στα 142 mg/l. Είναι επίσης χαρακτηριστικό πως για τον μόλυβδο και τον ψευδάργυρο το σύνολο των ρύπων εκτείνεται σε 0,080 mg/l. Ο αριθμός διαφοροποιείται σε 0,40 mg/l για τον μόλυβδο και 0,329 mg/l για τον ψευδάργυρο όταν τα οχήματα που χρησιμοποιούν το οδικό δίκτυο ξεπερνούν τις 30.000 την ημέρα. Επίσης, για την καλύτερη κατανόηση των αποτελεσμάτων, ενδείκνυται να αναφερθεί ότι οι πόλεις που αποτέλεσαν τα κέντρα διενέργειας των ερευνών είναι οι παρακάτω σύμφωνα με τον Πίνακα 6: η πόλη Urungi στην Κίνα, η Λυών στη Γαλλία και η Ergolz. Basel στην Ελβετία σε χρονικό διάστημα από τον Απρίλιο του 1991 μέχρι τον Απρίλιο του 1994.

Πίνακας 5. Συγκέντρωση ρύπων απορροών εθνικών οδών. Πηγή: (East – West Gateway Coordinating Council, 2000)

Ρύπος	Συγκέντρωση ρύπων (mg/l)	
	Κυκλοφοριακός φόρτος < 30.000 οχήματα/ημέρα	Κυκλοφοριακός φόρτος > 30.000 οχήματα/ημέρα
Ολικά αιωρούμενα στερεά	41	142
Πτητικά αιωρούμενα στερεά	12	39
Ολικός οργανικός άνθρακας	8	25
COD	49	114
Νιτρικά και νιτρώδη	0,46	0,76
Ολικό άζωτο Kjeldahl	0,87	1,83
Ολικός φώσφορος	0,16	0,40
Χαλκός	0,022	0,054
Μόλυβδος	0,080	0,40
Ψευδάργυρος	0,080	0,329

Πίνακας 6. Συγκέντρωση ρύπων σε διάφορα κράτη και περιόδους. Πηγή: (Polkowska et al., 2001)

Περιοχή δειγματοληψίας	Περίοδος δειγματοληψίας	Ρύποι	Μέση συγκέντρωση ή εύρος συγκέντρωσης
Urungi (Κίνα)	Απρίλιος - Μάιος 1991	Ca ²⁺ Na ⁺ K ⁺ Mg ²⁺ Cl ⁻ SO ₄ ²⁻	8,77-9,99 mg/dm ³ 0,62-1,05 mg/dm ³ 0,13-0,20 mg/dm ³ 1,03-1,06 mg/dm ³ 0,54-1,43 mg/dm ³ 3,37-9,79 mg/dm ³
Λυών (Γαλλία)	8 μήνες του έτους 1996	NO ³⁻ Cl ⁻ SO ₄ ²⁻ Pb ²⁺ pH	5,9 mg/dm ³ 23 mg/dm ³ 23 mg/dm ³ 1,1 mg/dm ³ 7,51
Μινεσότα (ΗΠΑ)	1 ολόκληρο χρόνο	NO ³⁻ + NO ²⁻ Cl ⁻ SO ₄ ²⁻ Na ⁺ PO ₄ ³⁻ pH Pb ²⁺	0,08 - 5 mg/dm ³ 0,96 - 46.000 mg/dm ³ 5 - 650 mg/dm ³ 2,23 - 6.700 mg/dm ³ 0,16 - 21,9 mg/dm ³ 6,9 - 9,3 11 - 2.100 mg/dm ³
Cumbria (Ηνωμένο Βασίλειο)	Ολόκληρο το έτος 1986	Pb ²⁺ Organic Pb	8,0 - 46,5 mg/dm ³ 0,037 - 1,30 mg/dm ³
Μαδρίτη (Ισπανία)	1 ολόκληρο χρόνο	Ολικοί αλειφατικοί υδρογονάνθρακες Ολικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες	412 - 2.179 mg/dm ³ 15,1 - 35,5 mg/dm ³
Aalborg (Δανία)	—	Ολικό άζωτο Ολικός φώσφορος Pb ²⁺	1 - 2 mg/dm ³ 0,2 - 0,5 mg/dm ³ 50 - 150 mg/dm ³

Λείπει μια παράγραφος που να δίνει στοιχεία για την ρύπανση με βάση την αρχική απορροή (first flash) που είναι πολύ σημαντική για τις απορροές των ομβρίων.

2.4. Το Φαινόμενο «First Flush»

Το φαινόμενο της “Πρώτης Έκπλυσης (First Flush)” παρατηρείται κατά την αρχική επιφανειακή απορροή μιας καταιγίδας. Κατά τη διάρκεια αυτής της φάσης, η ρύπανση του νερού που εισέρχεται στις αποχετεύσεις σε περιοχές με υψηλές αναλογίες αδιαπέραστων

επιφανειών είναι συνήθως πιο συγκεντρωμένη σε σύγκριση με την υπόλοιπη καταιγίδα. Κατά συνέπεια, αυτές οι υψηλές συγκεντρώσεις αστικών απορροών έχουν ως αποτέλεσμα υψηλά επίπεδα ρύπων που απορρίπτονται από τους υπονόμους ομβρίων στα επιφανειακά ύδατα (Di Modugno et al., 2015). Η "πρώτη έκπλυση" είναι ένα φαινόμενο που σχετίζεται με την εμφάνιση ή την πεποίθηση ότι το πρώτο τμήμα της απορροής όμβριων υδάτων σε ένα γεγονός καταιγίδας είναι το πιο ρυπασμένο. Ενώ οι περισσότεροι ερευνητές πιστεύουν ότι το πρώτο τμήμα της απορροής έχει υψηλότερες συγκεντρώσεις ρύπων, οι απόψεις ποικίλλουν ως προς τη σημασία των αυξημένων συγκεντρώσεων και εάν η πραγματική μάζα της πρώτης έκπλυσης είναι σημαντικό μέρος της συνολικής μάζας απορροής (Ghavanloughajar et al., 2021). Γενικά πιστεύεται ότι υπάρχει ένα πρώτο ξέπλυμα και συσχετίζουν τις επικίνδυνες συνθήκες οδήγησης με την έναρξη της βροχόπτωσης. Υπάρχει επίσης μια γενική πεποίθηση ότι η πρώτη βροχόπτωση μιας νέας περιόδου βροχών είναι η πιο ρυπασμένη (εποχιακή πρώτη έκπλυση) και ξεπλένει αρκετούς μήνες συσσώρευσης ρύπων. Τα επίπεδα συγκέντρωσης ρύπων επηρεάζονται από την ηλικία και την κατάσταση του συστήματος συλλογής και την ποσότητα διείσδυσης/εισροής σε σύγκριση με τη ροή υγιεινής. Οι κορυφές συγκέντρωσης ρύπων εξαρτώνται από το μέγεθος και την κλίση του συστήματος σωληνώσεων, το χρονικό διάστημα μεταξύ των καταιγίδων και τη συσσώρευση στερεών στο σύστημα συλλογής (Di Modugno et al., 2015).

Το φαινόμενο της πρώτης έκπλυσης (first flush) ή η μαζική πρώτη έκπλυση παρατηρείται σε γεγονότα βροχοπτώσεων και μπορεί να περιγραφεί ως η πρώτη απορροή κατά τη διάρκεια μιας καταιγίδας η οποία έχει υψηλή συγκέντρωση σε σχέση με την επόμενη απορροή. Η πρώτη μάζα νερού εξαρτάται από τη ροή και θα συμβεί όταν τόσο η συγκέντρωση όσο και η αρχική απορροή είναι υψηλή σε σχέση με τον ρυθμό στην επόμενη απορροή. Η ιδέα μπορεί να εφαρμοστεί σε οποιοδήποτε συγκεκριμένο συστατικό ή παράμετρο της ποιότητας νερού. Επομένως, μια πρώτη έκπλυση σε συνολικά οργανικό άνθρακα (total organic carbon, TOC), για παράδειγμα, μπορεί να ονομαστεί πρώτη έκπλυση TOC.

Η έννοια της πρώτης έκπλυσης μπορεί επίσης να εφαρμοστεί σε μια περίοδο βροχοπτώσεων. Για παράδειγμα, σε πολλές περιοχές του κόσμου οι βροχοπτώσεις εμφανίζονται σε

διαφορετικές περιόδους. Για παράδειγμα, το μεγαλύτερο μέρος της βροχόπτωσης στο Λος Άντζελες συμβαίνει από τον Νοέμβριο έως τον Μάρτιο περίπου, με τους μήνες Ιανουάριο και Φεβρουάριο να έχουν συνήθως τις μεγαλύτερες βροχοπτώσεις (Stenstrom & Kayhanian, 2005). Η μακρά περίοδος ξηρασίας από τον Απρίλιο ή τον Μάιο έως τον Οκτώβριο επιτρέπει τη συσσώρευση ρύπων. Η πρώτη μεγάλη βροχόπτωση της περιόδου, που σημειώνεται οποιαδήποτε στιγμή από τον Οκτώβριο έως τον Ιανουάριο, γενικά κινητοποιεί τους συσσωρευμένους ρύπους, δημιουργώντας μεγαλύτερη απόρριψη. Αυτό το φαινόμενο ονομάζεται εποχιακή (seasonal) πρώτη έκπλυση.

Οι παραπάνω περιγραφές συνοψίζονται με τους ακόλουθους ορισμούς:

- Πρώτη έκπλυση είναι η εκκένωση μεγαλύτερης μάζας ή μεγαλύτερης συγκέντρωσης στο πρώιμο μέρος μιας καταιγίδας σε σχέση με το μεταγενέστερο τμήμα της καταιγίδας. Ο όρος μπορεί να εφαρμοστεί σε οποιοδήποτε ρυπαντικό παράγοντα. Το μέγεθος της πρώτης έκπλυσης θα εξαρτηθεί από τις ειδικές συνθήκες της τοποθεσίας.
- Εποχιακή πρώτη έκπλυση είναι η εκκένωση μεγαλύτερης μάζας ή μεγαλύτερης συγκέντρωσης της πρώτης καταιγίδας ή των πρώτων λίγων καταιγίδων μιας περιόδου βροχών, σε σχέση με καταιγίδες αργότερα μέσα στην εποχή. Και οι δύο όροι μπορούν να εφαρμοστούν σε οποιαδήποτε παράμετρο ποιότητας νερού και για συστατικά όπως μέταλλα, απορρίμματα, σωματίδια, τοξικότητα, θολότητα, κ.λπ. και οι δύο όροι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να περιγράψουν μια πρώτη έκπλυση μάζας ή μια πρώτη έκπλυση συγκέντρωσης. Οι τροποποιητές των όρων υποδεικνύουν αν πρόκειται για μάζα ή συγκέντρωση.

Έχουν προταθεί διάφοροι τρόποι για τον ποσοτικό προσδιορισμό της πρώτης έκπλυσης μάζας και έχουν προταθεί απόλυτοι ποσοτικοί ορισμοί. Ένας πρώιμος ορισμός από τους Bertrand-Krajewski et al. (1998) πρότεινε την ύπαρξη πρώτης έκπλυσης εάν το 80% της μάζας ρύπων εκπέμπεται στο πρώτο 30% της απορροής. Άλλοι ορισμοί και παρατηρήσεις έχουν επίσης αναφερθεί (Geiger, 1987; Sansalone et al., 1997). Όλα κατά κάποιο τρόπο υποδηλώνουν υψηλότερο ποσοστό εκπομπών μάζας ρύπων στο πρώιμο μέρος της καταιγίδας

από ό,τι στο μεταγενέστερο μέρος, και το πρώιμο μέρος θεωρείται γενικά το πρώτο 20 έως 40% του όγκου απορροής.

Η παρουσία μιας μαζικής πρώτης έκπλυσης εξαρτάται από έναν αριθμό παραγόντων,, ειδικά σε μια μεγάλη λεκάνη απορροής, τα όμβρια ύδατα πρέπει να μεταφέρονται σε μεγάλη απόσταση σε ένα μόνο σημείο απόρριψης, ή στο στόμιο της λεκάνης απορροής. Επομένως, ο χρόνος διαδρομής της απορροής από διάφορα σημεία της λεκάνης απορροής στο σημείο παρακολούθησης είναι διαφορετικός (χρόνος ταξιδιού είναι ο χρόνος που έχει παρέλθει για να ρέει μια ποσότητα όμβριων υδάτων από το σημείο παραγωγής στο σημείο παρακολούθησης). Σε αυτήν την περίπτωση, η πρώτη έκπλυση από κάθε μικρή περιοχή της λεκάνης απορροής φτάνει στο στόμιο της λεκάνης απορροής σε διαφορετικούς χρόνους, γεγονός που αναμιγνύει τις μικρότερες πρώτες εκροές κάθε περιοχής σε ένα ευρύ μοτίβο εκροής. Επομένως, η πρώτη έκπλυση από μια περιοχή αναμιγνύεται με την απορροή από άλλες περιοχές που εμφανίστηκαν πολύ αργότερα κατά τη διάρκεια της καταιγίδας. Ο ορισμός της μεγάλης λεκάνης απορροής για αυτό το πλαίσιο είναι συνάρτηση του χρόνου ταξιδιού.

Η στεγανότητα της λεκάνης απορροής ή της λεκάνης απορροής επηρεάζει επίσης την πρώτη έκπλυση. Οι εξαιρετικά αδιαπέραστες επιφάνειες δημιουργούν υψηλές ταχύτητες που μεταφέρουν εύκολα στερεά ή καθαρίζουν ρύπους από τις επιφάνειες και η απορροή εμφανίζεται σχεδόν αμέσως στην αρχή της βροχοπτώσεως. Προηγούμενες εργασίες που πραγματοποιήθηκαν (Lau et al, 2002), αναφέρουν περιπτώσεις όπου η ροή εμφανίστηκε στη λεκάνη απορροής (~70% αδιαπέραστη) 10 έως 15 λεπτά μετά την έναρξη των μετρήσιμων βροχοπτώσεων. Η γρήγορη απορροή ή ο σύντομος χρόνος ταξιδιού που παρέχεται από εξαιρετικά αδιαπέραστες λεκάνες απορροής, παρέχει περισσότερες ευκαιρίες για πρώτες εκπλύσεις.

Ένα μεγάλο μέρος προσπαθειών έχει αφιερωθεί στην εκτίμηση της μαζικής πρώτης έκπλυσης των εκπομπών αυτοκινητοδρόμων, με στόχο τη βελτίωση της αποτελεσματικότητας των “Βέλτιστων Πρακτικών Διαχείρισης (Best Management

Practices,- BMPs)” που εκμεταλλεύονται την πρώτη έκπλυση. Οι λεκάνες απορροής των αυτοκινητοδρόμων είναι χρήσιες γης που είναι πιθανό να έχουν μια πρώτη έκπλυση.

Μια BMP που εκμεταλλεύεται την πρώτη έκπλυση ονομάζεται μερικές φορές «φιλική στην πρώτη έκπλυση» και ένα παράδειγμα τέτοιας BMP είναι μια λεκάνη διήθησης/καθίζησης. Μια λεκάνη διήθησης/καθίζησης μπορεί να λειτουργήσει με έναν από τους δύο τρόπους: να λειτουργήσει ως συσκευή ροής, η οποία αφαιρεί μέρος των ρυπαντικών ουσιών, όπως τα αιωρούμενα στερεά, κατά τη διάρκεια μιας καταιγίδας. Για μεγάλες καταιγίδες, πάνω από τη συχνότητα σχεδιασμού της λεκάνης, κάποιο μέρος του ρυθμού ροής θα παρακαμφθεί ή η λεκάνη θα λειτουργήσει με υψηλή ταχύτητα ροής και μειωμένη απόδοση. Ένας εναλλακτικός τρόπος λειτουργίας της λεκάνης είναι να γεμίσει με την πρώτη απορροή και να παρακάμψει την υπόλοιπη απορροή. Η δεύτερη στρατηγική παρέχει μεγαλύτερη ευκαιρία στα μικρά σωματίδια να καθιζάνουν, και θα είναι μια ανώτερη στρατηγική εάν υπάρχει μια σημαντική μάζα πρώτης έκπλυσης.

2.5. Ιδιότητες που Αλλοιώνουν την Ποιότητα των Απορροών Ομβρίων

Είναι γεγονός πως η ποιοτική κατάσταση των ομβρίων υδάτων παρουσιάζεται διαφορετική, ανάλογα με την συνδρομή ή όχι ορισμένων παραγόντων. Οι κυριότερες συνθήκες που ενδέχεται να επηρεάσουν την σύσταση των υδάτων είναι δυνατόν να συνοψιστούν ως ακολούθως (Choi et al., 2020):

1. **Κυκλοφοριακός φόρτος:** η εκροή των ομβρίων υδάτων αλλοιώνει ουσιαστικά την σύσταση του νερού στις πηγές που συγκεντρώνεται, αποκλειστικά στην περίπτωση που το υπό κρίση οδικό δίκτυο εξυπηρετεί ημερησίως αριθμό οχημάτων που ξεπερνά τις 30.000. Στο συμπέρασμα αυτό κατέληξε η FHWA (Federal Highway Administration) μετά τη διενέργεια εξέτασης που πραγματοποιήθηκε το έτος 1970 στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής.
2. **Ιδιότητες βροχόπτωσης:** από την μία πλευρά, ο αριθμός των ημερών που μεσολαβεί από την εμφάνιση μιας βροχόπτωσης μέχρι το επόμενο φαινόμενο βροχόπτωσης,

είναι ενδεικτικός για την ποσότητα ρυπογόνων ουσιών που βρίσκονται στο οδικό δίκτυο. Από την άλλη πλευρά, η ένταση του εν λόγω καιρικού φαινομένου σε συνδυασμό με την ποσότητα των ομβρίων υδάτων διαμορφώνουν τη δυνατότητα διάλυσης των ομβρίων υδάτων και τον ρυθμό απορρόφησης των ρυπαντικών ουσιών στις υδάτινες πηγές. Η κατάσταση αυτή διαμορφώνεται από την ενσωμάτωση σωματιδίων στο σύνολο των ρυπογόνων ουσιών. Η μεγαλύτερη ποσοτικά εμφάνιση ρύπων τοποθετείται χρονικά κατά τη διάρκεια της πρώτης απορροής, ή συνεκδοχικά κατά τη διάρκεια της “first flush” (McGrane, 2016).

3. **Γνωρίσματα του οδοστρώματος:** είναι χαρακτηριστικό πως η πρώτη ύλη από την οποία δημιουργήθηκε το οδικό δίκτυο δεν ασκεί ουσιώδη επιρροή στην σύσταση των ομβρίων υδάτων. Αντιθέτως, ως καθοριστικός παράγοντας θεωρείται η μέθοδος που χρησιμοποιείται για την απομάκρυνση των ομβρίων υδάτων από την επιφάνεια που διέρχονται τα οχήματα (Liu et al., 2015).
4. **Φύση των ρυπογόνων ουσιών:** τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των ρύπων όπως επίσης και το ποσοστό ύπαρξής τους στα όμβρια ύδατα εξαρτούν την διαμόρφωση των ιδιοτήτων των υδάτινων πόρων στους οποίους συγκεντρώνονται.
5. **Τοπικές συνθήκες:** η ποσότητα των ρυπογόνων ουσιών που ανευρίσκονται στις υδάτινες πηγές τελεί σε άμεση συνάρτηση με τα καιρικά φαινόμενα που εμφανίζονται συχνότερα σε έναν ορισμένο τόπο (Shorshani et al., 2015).

3. Διαχείριση Πλημμυρικών Φαινομένων στο Οδόστρωμα

3.1.Θεσμικό Πλαίσιο Διαχείρισης Πλημμυρών

Σε κάθε δράση που αφορά την αντιμετώπιση των πλημμυρών προαπαιτούμενη είναι η διαμόρφωση ενός λειτουργικού πλαισίου συντονισμού, οργάνωσης και διαχείρισης των πλημμυρών, καθώς είναι γεγονός πως οι εμπλεκόμενοι φορείς συχνά δεν διατηρούν ανοιχτούς διαύλους επικοινωνίας μεταξύ τους, με αποτέλεσμα κατά τη διάρκεια της εκδήλωσης καταστάσεων έκτακτης ανάγκης να παρατηρείται μετακύλιση ευθυνών και αδυναμία ανάληψης πρωτοβουλιών για την αποκατάσταση των επιπτώσεων που προκάλεσε η εκδήλωση του φαινομένου. Υπό το πρίσμα αυτό, στο επίκεντρο ενός ενιαίου και ολοκληρωμένου σχεδίου δράσης τίθεται η διαμόρφωση ενός θεσμικού πλαισίου που θα συμβάλλει στην αποτελεσματική ανάληψη της ευθύνης δράσης στον αρμόδιο κατά περίπτωση φορέα.

Ένα από τα ουσιώδη στάδια της συνολικής διαχείρισης των πλημμυρών στο οδόστρωμα αποτελεί το έργο της αξιολόγησης και της διαχείρισης του κινδύνου της πλημμύρας, όπως αυτό προκύπτει από το θεσμικό πλαίσιο που ακολούθησε την ευρωπαϊκή οδηγία (2007/60/EK), το οποίο αποτελείται από τους, καταρτισμένους και αναρτημένους στον ιστότοπο του Υπουργείου Περιβάλλοντος και Ενέργειας, Χάρτες Επικινδυνότητας Πλημμύρας και Χάρτες Κινδύνων Πλημμύρας. Οι χάρτες που έχουν εκδοθεί για κάθε ένα από τα δεκατέσσερα υδατικά διαμερίσματα της χώρας αποσκοπούν στη αποτύπωση των ενδεχόμενων κινδύνων εκδήλωσης πλημμύρας και συμβάλλουν στην έγκαιρη δράση αναφορικά με τα απαιτούμενα έργα αντιπλημμυρικής προστασίας.

Στο ίδιο πλαίσιο ανήκουν και τα Σχέδια Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας, τα οποία περιγράφουν με σαφήνεια τους κύριους στόχους που επιδιώκεται να επιτευχθούν σε περίπτωση πλημμύρας, καθώς και το απαραίτητα μέτρα που πρέπει να παρθούν προκειμένου κάτι τέτοιο να καταστεί εφικτό. Εναρμονισμένα με την ευρωπαϊκή οδηγία, τα εγκεκριμένα Σχέδια Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας, καθώς και τα σχετικά πορίσματα της

Προκαταρκτικής Αξιολόγησης Κινδύνων Πλημμύρας βρίσκονται αναρτημένα στη σελίδα του αρμόδιου Υπουργείου Περιβάλλοντος και Ενέργειας.

Το θεσμικό πλαίσιο που περιβάλλει τις δράσεις που αφορούν τόσο στη μελέτη όσο και στην εκτέλεση και συντήρηση των έργων αντιπλημμυρικής προστασίας αναδύεται ως ένα ιδιαίτερος κρίσιμος παράγοντας, καθώς αποτελεί το θεμέλιο της συνεργασίας των αρμόδιων φορέων. Σύμφωνα με τον Ν. 4258/2014 (ΦΕΚ 94/Α'/2014) το έργο της μελέτης και εκτέλεσης έργων αντιπλημμυρικής προστασίας, όπως επίσης και οι εργασίες συντήρησης στα υδατορέματα αποτελούν αρμοδιότητα των υπηρεσιών του Υπουργείου Περιβάλλοντος και Ενέργειας, των αντίστοιχων υπηρεσιών του Υπουργείου Υποδομών & Μεταφορών και αυτών της Αποκεντρωμένης Διοίκησης ή της Περιφέρειας. Εφόσον οι αρμόδιες υπηρεσίες το κρίνουν απαραίτητο, τα έργα αυτά μπορούν να ανατεθούν στους οικείους Ο.Τ.Α. Α' βαθμού, στις οικείες Περιφερειακές Ενότητες και τις οικείες Περιφέρειες, αφού προηγουμένως οι σχετικές δράσεις λάβουν την έγκριση από τον αρμόδιο Συντονιστή Αποκεντρωμένης Διοίκησης. Από την ημερομηνία εφαρμογής του Ν. 3852/2010 και στο εξής, οι σχετικές με τη μελέτη, την κατασκευή και τη συντήρηση έργων αντιπλημμυρικής προστασίας αρμοδιότητες των Δήμων περιέρχονται στις καλλικρατικές Περιφέρειες και στις αρμόδιες υπηρεσίες τους.

Οι αρμόδιοι για την αντιμετώπιση των επιπτώσεων που μπορεί να προκληθούν από ενδεχόμενη πλημμύρα στο οδόστρωμα θεωρείται αναγκαίο να ενημερώνονται αναφορικά με τα καιρικά φαινόμενα που προβλέπεται να επικρατήσουν στην περιοχή ευθύνης τους. Η ενημέρωση αυτή, σε θεσμικό επίπεδο, προέρχεται από την Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία (Ε.Μ.Υ.), η οποία σε καθημερινή βάση εκδίδει τα δελτία πρόγνωσης καιρού, αλλά και ειδικά δελτία (Έκτακτα Δελτία Επιδείνωσης Καιρού (ΕΔΕΚ) και Έκτακτα Δελτία Πρόγνωσης Επικίνδυνων Καιρικών Φαινομένων (ΕΔΠΕΚΦ)). Σύμφωνα με το ΠΔ 161/1997 (ΦΕΚ 142/Α'/1997), η Ε.Μ.Υ. αποτελεί τον αποκλειστικό φορέα ενημέρωσης που μπορεί να χρησιμοποιηθούν θεσμικά για την προετοιμασία της αντιμετώπισης ακραίων καιρικών φαινομένων.

Εφόσον υπάρξει πρόβλεψη από την ΕΜΥ για εκδήλωση επικίνδυνων καιρικών φαινομένων, ενημερώνεται θεσμικά το Κέντρο Επιχειρήσεων της Γενικής Γραμματείας Πολιτικής Προστασίας, το οποίο με τη σειρά του προβαίνει στη ενημέρωση των αρμοδίων φορέων, έτσι ώστε να επιτευχθεί το μέγιστο επίπεδο ετοιμότητας για την αντιμετώπιση των επικείμενων καιρικών φαινομένων. Ανάμεσα στους φορείς που ενημερώνονται άμεσα από το Κέντρο Επιχειρήσεων βρίσκονται και οι επιφορτισμένοι με τη λειτουργία και τη συντήρηση του οδικού δικτύου φορείς, οι οποίοι τίθενται σε ετοιμότητα ώστε να ακολουθήσουν τα προβλεπόμενα από το σχέδιο δράσης βήματα.

Στην περίπτωση της εκδήλωσης του πλημμυρικού φαινομένου προβλέπεται αρχική ειδοποίηση κάθε εμπλεκόμενου φορέα από τις κατά τόπους υπηρεσίες της ΕΛ.ΑΣ. και του Πυροσβεστικού Σώματος. Βάσει του Σχεδίου «Ξενοκράτης», οι υπηρεσίες των σωμάτων ασφαλείας ελέγχουν την κατάσταση που επικρατεί στις περιοχές που έχουν πληγεί από πλημμύρα και, εν συνεχεία, προβαίνουν στην ενημέρωση των Αποκεντρωμένων Οργάνων Πολιτικής Προστασίας, οι οποίοι στη συνέχεια θα ενεργοποιήσουν το μηχανισμό για να συνδράμουν στο έργο της διαχείρισης των επιπτώσεων του πλημμυρικού φαινομένου και στην προστασία της ζωής και της περιουσίας των πολιτών.

Σε περίπτωση που τα πλημμυρικά φαινόμενα που έχουν εκδηλωθεί διαμορφώνουν συνθήκες έκτακτης ανάγκης κρίνεται απαραίτητη η κινητοποίηση των αρμόδιων φορέων, έτσι ώστε να προβούν στην αξιολόγηση της υφιστάμενης κατάστασης και να εκτελέσουν δράσεις πολιτικής προστασίας για να αντιμετωπίσουν τις επιπτώσεις που έχει επιφέρει η πλημμύρα. Οι υπεύθυνοι φορείς, έχοντας διαρκή ενημέρωση σχετικά με τα δεδομένα που προκύπτουν αναφορικά με το πλημμυρικό φαινόμενο, εμπλέκονται στις δράσεις, ιδιαίτερα εφόσον το κατώτερο διοικητικό επίπεδο κρίνεται πως δεν μπορεί να διαχειριστεί την κατάσταση, κυρίως δε όταν έχει διαπιστωθεί πως η ένταση του φαινομένου είναι τέτοια που απειλεί ευθέως τη ζωή και την περιουσία των πολιτών.

Αναφορικά με το οδικό δίκτυο προβλέπεται η δραστηριοποίηση των φορέων που είναι επιφορτισμένοι με τη διασφάλιση της ομαλής λειτουργίας του (εθνικό, επαρχιακό ή δημοτικό

οδικό δίκτυο), η οποία περιλαμβάνει την απαγόρευση ή τον περιορισμό της κυκλοφορίας εφόσον έχει παρατηρηθεί πως τα πλημμυρικά ύδατα αποτελούν απειλή για τα διερχόμενα αυτοκίνητα ή τους πεζούς που κινούνται στο οδόστρωμα. Σε περιπτώσεις που το οδόστρωμα έχει κατακλυστεί από τα πλημμυρικά ύδατα ή εφόσον έχουν καταγραφεί φθορές σε αυτό λόγω της έντονης βροχόπτωσης κρίνεται απαραίτητη η συνδρομή της Τροχαίας, με ενέργειες της οποίας διασφαλίζεται η τοποθέτηση από τους φορείς λειτουργίας του οδικού δικτύου των σχετικών σημάτων που θα συμβάλλουν στην αποφυγή ατυχημάτων έως ότου αντιμετωπιστούν οι συνέπειες και αποκατασταθεί η κυκλοφορία των οχημάτων.

3.2. Αρμόδιοι Φορείς Διαχείρισης Πλημμυρών στο Οδόστρωμα

Το κρατικό οδικό δίκτυο της χώρας διαιρείται σε εθνικές, επαρχιακές και δημοτικές ή κοινοτικές και αγροτικές οδούς (ΠΔ 28/1929, άρ. 1). Το ισχύον νομοθετικό πλαίσιο καθορίζει με μια σειρά νομολογιών τις αρμοδιότητες των Δήμων και των Περιφερειακών Ενοτήτων σε σχέση με τον έλεγχο και τη συντήρηση του δικτύου όμβριων υδάτων στο οδικό δίκτυο, προκειμένου να διασφαλίζεται η εύρυθμη λειτουργία του. Ανάμεσα στις αρμοδιότητες που αναλαμβάνει ο φορέας που είναι υπεύθυνος για τις εργασίες συντήρησης του οδικού δικτύου και, συνακόλουθα, για τη συντήρηση του δικτύου όμβριων υδάτων αυτού είναι, βάσει της Υπουργικής Απόφασης (Δ17α/06/52/ΦΝ 443/20-3-2007, ΦΕΚ 398/Β'/2007), ο καθαρισμός και η εξασφάλιση πλήρους λειτουργικότητας των εσχάρων των φρεατίων υδροσυλλογής, των καπακιών των φρεατίων επίσκεψης, του σώματος των φρεατίων υδροσυλλογής, των συνδετηρίων αγωγών των συγκεκριμένων φρεατίων με το υφιστάμενο δίκτυο όμβριων υδάτων, των φρεατίων επίσκεψης και των αγωγών του δικτύου όμβριων υδάτων.

Ειδικότερα, οι αρμόδιοι φορείς είναι επιφορτισμένοι με το έργο του καθαρισμού τόσο των εσχάρων των φρεατίων υδροσυλλογής όσο και του σώματος των φρεατίων υδροσυλλογής, ενώ αντίστοιχη πρόβλεψη θα πρέπει να υπάρχει και αναφορικά με τον καθαρισμό των συνδετηρίων αγωγών μεταξύ φρεατίων και κεντρικού αγωγού όμβριων υδάτων. Εξίσου σημαντικό είναι το έργο του ελέγχου της παροχετευτικότητας των αγωγών των όμβριων

υδάτων και η πρόβλεψη του καθαρισμού των αγωγών σε περίπτωση που κριθεί απαραίτητο, ενώ συχνοί έλεγχοι για τον εντοπισμό φθορών θα πρέπει να γίνονται στις εσχάρεις των φρεατίων υδροσυλλογής, του σώματος των φρεατίων υδροσυλλογής και επίσκεψης, των καλυμμάτων των φρεατίων επίσκεψης των αγωγών όμβριων υδάτων και των συνδετήριων αγωγών. Ανακεφαλαιωτικά, το έργο των αρμόδιων φορέων θα πρέπει να αποσκοπεί στον έλεγχο και στην κατά περίπτωση επισκευή και συντήρηση κάθε στοιχείου που αποτελεί μέρος του δικτύου όμβριων υδάτων στο οδικό δίκτυο.

Οι φορείς που είναι αρμόδιοι για τη συντήρηση των οδών και συγκεκριμένα για το επαρχιακό οδικό δίκτυο και το εθνικό οδικό δίκτυο εκτός των αυτοκινητοδρόμων ανήκουν στις υπηρεσίες των νέων Περιφερειών που διαμορφώθηκαν μετά την εφαρμογή του Προγράμματος «Καλλικράτης» (Ν.3852/2010, ΦΕΚ 87/Α'/2010). Για το υπόλοιπο δημόσιο οδικό δίκτυο, εξαιρουμένων των αυτοκινητοδρόμων, την ευθύνη φέρουν οι κατά τόπους δημοτικές αρχές, εντός των διοικητικών ορίων των οποίων βρίσκονται οι οδοί. Με τον Ν.3481/2006 (ΦΕΚ 162Α/2-8-2006) ορίζεται συγκεκριμένα πως στις περιπτώσεις που μια οδός διέρχεται από περιοχή διοικητικής ευθύνης περισσότερων του ενός δήμων, οι ευθύνες λειτουργίας και συντήρησης βαραινουν τμηματικά το δήμο στην ευθύνη του οποίου εντάσσεται το κάθε τμήμα της οδού. Στο πλαίσιο των αρμοδιοτήτων των δήμων εντάσσεται και η ευθύνη για τον έλεγχο, τη συντήρηση και την αποκατάσταση των φθορών που παρατηρούνται λόγω πλημμυρικών φαινομένων στις αγροτικές οδούς του τομέα ευθύνης τους.

Στα τμήματα των αυτοκινητοδρόμων που έχουν ολοκληρωθεί και βρίσκονται υπό παραχώρηση, οι αρμοδιότητες συντήρησης του δικτύου όμβριων υδάτων βαραινουν τις αντίστοιχες εταιρείες διαχείρισης. Στα υπό κατασκευή ή στα τμήματα που δεν έχουν παραχωρηθεί, όπως και στο δευτερεύον οδικό δίκτυο των αυτοκινητοδρόμων, η ευθύνη της συντήρησης κατά τη διάρκεια των χειμερινών μηνών ανήκει στις αρμόδιες τεχνικές εταιρείες του Υπουργείου Υποδομών και Μεταφορών.

Ειδική αναφορά σχετικά με την ευθύνη για την εκτέλεση έργων συντήρησης οδικού δικτύου γίνεται για την Περιφέρεια Αττικής, στην Περιφέρεια της οποίας έχουν περιέλθει η αρμοδιότητες που άλλοτε βάραιναν τις υπηρεσίες της ΓΓΔΕ (ΔΚΕΣΟ, ΔΚΕΟ, ΔΚΥΕ) του Υπουργείου Υποδομών και Μεταφορών. Επίσης, για τους Δήμους της Περιφέρειας Νοτίου Αιγαίου, των οποίων ο πληθυσμός δεν υπερβαίνει τις 4.000, προβλέπεται ειδική διαδικασία που περιλαμβάνει τη διατύπωση σχετικού αιτήματος εκτέλεσης έργων από τον οικείο δήμο στον οποίον ανήκει χωρικά το οδικό δίκτυο με αποδέκτη την Περιφέρεια και συγκεκριμένα τα αρμόδια τεχνικά τμήματα των Κυκλάδων και των Δωδεκανήσων. Ακόμη μια εξαίρεση από το γενικό κανονιστικό πλαίσιο παρατηρείται στην περίπτωση των αγωγών και των φρεατίων του) παντοροϊκού συστήματος του Νομού Αττικής και του Νομού Θεσσαλονίκης, καθώς η Ε.Υ.Δ.ΑΠ. Α.Ε. και η Ε.Υ.Α.Θ. ΑΕ αντίστοιχα, είναι υπεύθυνες για τη λειτουργία και τη συντήρηση των αγωγών που παροχετεύουν ενιαία όμβρια και ακάθαρτα ύδατα και εντοπίζονται κάτω από οδούς την ευθύνη συντήρησης των οποίων είχε άλλοτε το Υπουργείου Υποδομών & Μεταφορών και οι υπηρεσίες της Γ.Γ.Δ.Ε.

Στο πλαίσιο της ολοκληρωμένης αντιμετώπισης των συνεπειών που προκύπτουν εξαιτίας των πλημμυρικών φαινομένων και δεδομένου του κρίσιμου ρόλου της ξεκάθαρης απόδοσης αρμοδιοτήτων στους φορείς, η Διεύθυνση Σχεδιασμού και Αντιμετώπισης Εκτάκτων Αναγκών της ΓΓΠΠ συνέταξε 67 χάρτες σε επίπεδο Περιφερειακής Ενότητας και 14 χάρτες σε επίπεδο Περιφέρειας, έτσι ώστε να κοινοποιήσει στους αρμόδιους φορείς την κατανομή των αρμοδιοτήτων συντήρησης του οδικού δικτύου της χώρας. Η συγκεκριμένη χαρτογράφηση των αρμοδιοτήτων λειτουργεί επικουρικά στο έργο των φορέων, καθιστώντας ευκολότερο το έργο της αποσαφήνισης του φορέα συντήρησης και λειτουργίας σε περίπτωση που εκδηλωθεί κατάσταση έκτακτης ανάγκης που να απαιτεί τη συνδρομή των αντίστοιχων φορέων εκτάκτων αναγκών και φορέων λειτουργίας και συντήρησης των κοινωφελών δικτύων. Προκειμένου να αυξηθεί η αποτελεσματικότητα της δράσης αυτής, η Διεύθυνση Σχεδιασμού και Αντιμετώπισης Εκτάκτων Αναγκών της ΓΓΠΠ απέστειλε τους χάρτες στους σχετικούς φορείς συντήρησης του οδικού δικτύου και ζήτησε τη συνδρομή τους στο έργο του ελέγχου και της επικαιροποίησης των αναγραφόμενων σε αυτούς στοιχείων.

Κάθε αρμόδιος φορέας, είτε σε δημοτικό είτε σε περιφερειακό επίπεδο, θα πρέπει να θέσει στο επίκεντρο των δράσεών του τον έλεγχο λειτουργίας και τη συντήρηση του δικτύου όμβριων υδάτων του τομέα ευθύνης του, διενεργώντας περιοδικούς ελέγχους σε τακτά χρονικά διαστήματα, έτσι ώστε να αποτρέπονται οι δυσμενείς επιπτώσεις μιας ενδεχόμενης πλημμύρας. Οι αρμόδιες τεχνικές υπηρεσίες των Δήμων και των Περιφερειών θα πρέπει να αναλαμβάνουν τον έλεγχο και τον καθαρισμό των φρεατίων υδροσυλλογής σε τακτά χρονικά διαστήματα και ιδιαιτέρως προτού παρατηρηθούν τα έντονα φαινόμενα χειμερινών βροχοπτώσεων, όπως επίσης και εφόσον έχει εκδηλωθεί κάποια έντονη βροχόπτωση στο οδικό δίκτυο των αστικών ιστών.

4. Μείωση Απορροών Όμβριων από Οδικά Δίκτυα

4.1. Το Μοντέλο Διαχείρισης Όμβριων Υδάτων

Το μοντέλο διαχείρισης όμβριων υδάτων είναι ένα ολοκληρωμένο μαθηματικό μοντέλο που αναπτύχθηκε από την “Υπηρεσία Προστασίας Περιβάλλοντος των Ηνωμένων Πολιτειών (United States Environmental Protection Agency - USEPA)” για το σχεδιασμό και τη διαχείριση αστικών όμβριων υδάτων. Μπορεί να προσομοιώσει δυναμικά ολόκληρη τη διαδικασία αστικής βροχόπτωσης-απορροής, συμπεριλαμβανομένης της επιφανειακής απορροής, της μεταφοράς σωλήνων αποχέτευσης και της συμβολής του νερού, της ποσότητας και της ποιότητας του νερού. Επί του παρόντος, το “Μοντέλο Διαχείρισης Νερών από Καταιγίδες (Storm Water Management Model - SWMM)” είναι το καλύτερο μοντέλο που έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως σε πολλές χώρες. Στο SWMM, μια λεκάνη απορροής συνήθως χωρίζεται σε πολλές υπολεκάνες, καθεμία από τις οποίες είναι μια ανεξάρτητη υδραυλική μονάδα, και θεωρείται ότι υπάρχει μόνο μία έξοδος αποστράγγισης για τη συλλογή της επιφανειακής απορροής που παράγεται από κάθε περιοχή υπολεκάνης. Η διαδικασία απορροής υπολογίζεται αντίστοιχα με βάση τα χαρακτηριστικά κάθε υπολεκάνης απορροής. Τέλος, ολόκληρη η απορροή *υπερτίθεται (τοποθετείται πάνω/επάλληλα)* μέσω λογισμού ροής.

Το *διαπερατό (αυτό που μπορεί να διαποτιστεί)* οδόστρωμα αποτελεί μέρος της μέτρησης ανάπτυξης της χαμηλής πρόσκρουσης (LID), η οποία μπορεί να μειώσει τον συντελεστή αστικής επιφανειακής απορροής και τη ροή αιχμής πλημμύρας. Στη μελέτη των (Zhu et al., 2019) ένας αμφίδρομος δρόμος με έξι λωρίδες στο Nanjing επιλέχθηκε ως περιοχή μελέτης. Το “Μοντέλο Διαχείρισης Όμβριων Υδάτων (Βρόχινων Νερών) (Storm Water Management Model - SWMM)” χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση της επίδρασης διαφορετικών δομών οδοστρώματος (επιφάνεια αποστράγγισης, διαπερατό πεζοδρόμιο και διαπερατός δρόμος) υπό διαφορετικές συνθήκες βροχόπτωσης στη μείωση της επιφανειακής απορροής και στον έλεγχο των αστικών όμβριων υδάτων. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης δείχνουν ότι η επιφάνεια αποστράγγισης μπορεί να μειώσει μέρος της επιφανειακής

απορροής, αλλά δεν επηρεάζει τη μείωση και την υστέρηση της κορυφής της πλημμύρας. Το διαπερατό οδόστρωμα μπορεί να μειώσει μέρος της επιφανειακής απορροής και της αιχμής πλημμύρας και μπορεί να καθυστερήσει τον χρόνο αιχμής. Ο διαπερατός δρόμος έχει καλύτερη επίδραση στη μείωση του συντελεστή απορροής και της αιχμής πλημμύρας, γεγονός που μπορεί να μειώσει αποτελεσματικά την πίεση της αστικής αποχέτευσης και να μειώσει τον κίνδυνο πλημμύρας των όμβριων υδάτων.

Οι αδιαπέρατες επιφάνειες όπως οι κατασκευές από σκυρόδεμα και οι ασφαλτοστρωμένοι δρόμοι έχουν αυξηθεί σημαντικά, γεγονός που αυξάνει την επιφανειακή απορροή (uncountable - overflowed liquid) και τον κίνδυνο αστικών πλημμυρών. Επιπλέον, τα υπόγεια ύδατα δεν τροφοδοτούνται αποτελεσματικά λόγω της έλλειψης αποστράγγισης των όμβριων υδάτων. Πολλές πόλεις λοιπόν αντιμετωπίζουν σοβαρή έλλειψη νερού και ξηρασίας. Οι ανεπτυγμένες χώρες όπως οι Ηνωμένες Πολιτείες, το Ηνωμένο Βασίλειο, η Αυστραλία άρχισαν να δίνουν προσοχή σε τέτοια προβλήματα πριν από δεκαετίες. Ανέπτυξαν μια σειρά τεχνικών για τον έλεγχο της αστικής απορροής και εισήγαγαν μια σειρά από σχέδια διαχείρισης όμβριων υδάτων και κατευθυντήριες γραμμές. Αυτές οι τεχνικές και οδηγίες έχουν εφαρμοστεί συστηματικά. Από τον Οκτώβριο του 2014, η Κίνα έχει προτείνει μια στρατηγική «πόλη - σφουγγάρι» για την ανάπτυξη της αστικοποίησης βασισμένη στη σύνοψη των αρχών ελέγχου των αστικών όμβριων υδάτων σε ξένες χώρες. Με τον τρόπο αυτό εκδόθηκε μια σειρά από πολιτικές και τεχνικές κατευθυντήριες γραμμές. Ο σχεδιασμός του αστικού δρόμου θα πρέπει να προσαρμόζεται έγκαιρα, καθώς ο αστικός δρόμος είναι πολύ σημαντικό μέρος της ανάπτυξης της πόλης, όπως και η δημιουργία οικολογικών τάφρων με γρασίδι, βυθισμένοι χλοοτάπητες, βροχόκηποι και διαπερατό πεζοδρόμιο. Ο Zhang (2009) χρησιμοποίησε το SWMM για να προσομοιώσει την επιφανειακή απορροή μιας κατοικημένης περιοχής στο Nanjing που ανακατασκευάστηκε με βυθισμένο γκαζόν και διαπερατό πεζοδρόμιο. Οι Jin et al. (2010) χρησιμοποίησαν το SWMM για να μελετήσουν τη διακύμανση της κορυφής (του πιο σημαντικού σημείου) πλημμύρας του αγωγού αποστράγγισης στην περιοχή που καλύπτεται από διαπερατό τούβλο και βυθισμένο γκαζόν στο Πεκίνο. Οι Zhenci και Guo (2017) μελέτησαν τη σχέση μεταξύ βροχόπτωσης και

απορροής στην περιοχή κάτω από τέσσερις διαφορετικές υποκείμενες συνθήκες με κατανεμημένο μοντέλο σταθερότητας νερού. Ο Zhou (2017) καθιέρωσε το μοντέλο απορροής και μελέτησε την ικανότητα του βυθισμένου χλοοτάπητα να αποθηκεύει βροχοπτώσεις, όταν ήταν υπό συνθήκες διαφορετικής συχνότητας βροχοπτώσεων και διαφορετικής αναλογίας πρασίνου. Οι Cai et al. (2017) χρησιμοποίησαν το SWMM για να προσομοιώσουν τις συνθήκες απορροής και αποστράγγισης υπό διαφορετικές συνθήκες βροχόπτωσης στο Guangzhou. Η Palla χρησιμοποίησε το SWMM για να προσομοιώσει την υδρολογική απόκριση μιας μικρής αστικής λεκάνης απορροής που καλύπτονταν από πράσινες στέγες και διαπερατά πεζοδρόμια. Οι Guan et al. (2015) ποσοτικοποιούν τις επιπτώσεις των κοινών τεχνικών διαχείρισης των όμβριων υδάτων στη δημιουργία αστικής απορροής, όπως οι πράσινες στέγες και τα διαπερατά πεζοδρόμια. Ο Τσιχριντζής δοκίμασε την εφαρμογή του SWMM σε μικρές υποτροπικές αστικές λεκάνες απορροής και παρείχε στους μοντελιστές έναν τρόπο επιλογής των κατάλληλων παραμέτρων εισόδου που θα χρησιμοποιηθούν στις μελέτες σχεδιασμού. Ο Park χρησιμοποίησε το SWMM για να προσομοιώσει και να διερευνήσει τις αλλαγές στην απορροή και την αιχμή της απορροής με σχέδια LID. Ο Do-Hyson (2005) χρησιμοποίησε το SWMM για να διερευνήσει και να αναλύσει τα χαρακτηριστικά απορροής μη σημειακών ρύπων στη δημοτική περιοχή του Jeonju. Ο Temprano (2006) χρησιμοποίησε το SWMM για να προβλέψει τη ρύπανση σε βροχερό καιρό σε μια λεκάνη απορροής συνδυασμένου συστήματος αποχέτευσης στο Santander.

4.2. Παράγοντες Ελέγχου Συντελεστών Απορροής

Ο συντελεστής απορροής, που ορίζεται ως ο λόγος της συνολικής απορροής προς τη βροχόπτωση για μια χρονική περίοδο σε μια συγκεκριμένη λεκάνη απορροής, είναι μια από τις πιο σημαντικές μεταβλητές που περιγράφουν τις υδρολογικές διεργασίες (Merz & Blöschl, 2009; Zhang et al., 2014; Crow et. al., 2019). Ένας συντελεστής απορροής παρέχει βασικές πληροφορίες σχετικά με τις επιπτώσεις που έχουν τα χαρακτηριστικά του κλίματος και της λεκάνης απορροής στη δημιουργία απορροής εντός μιας λεκάνης απορροής (Lin & Wei, 2008; Zhang et al., 2014).

Επιπλέον, διάφοροι παράγοντες ελέγχουν τους συντελεστές απορροής και οι αλληλεπιδράσεις τους είναι επίσης περίπλοκες. Επομένως, ο εντοπισμός των κυρίαρχων παραγόντων που ελέγχουν έναν συντελεστή απορροής είναι σημαντικός. Τα χαρακτηριστικά του κλίματος και της λεκάνης απορροής μπορούν να επηρεάσουν τις υδρολογικές διεργασίες στις λεκάνες απορροής και η πιο άμεση επίδραση των αλλαγών σε αυτούς τους παράγοντες είναι η αλλαγή στην απορροή λεκάνης απορροής. Σημαντικά χαρακτηριστικά λεκάνης απορροής που επηρεάζουν την απορροή περιλαμβάνουν τη χρήση γης, το τοπίο, τη λιθολογία, τις ιδιότητες του εδάφους και την τοπογραφία. Ο συντελεστής απορροής μπορεί να επηρεαστεί σε μεγάλο βαθμό από τα χαρακτηριστικά του κλίματος και της λεκάνης απορροής (Yan et al., 2019).

Ο συντελεστής απορροής συσχετίζεται σε μεγάλο βαθμό με κλιματικούς παράγοντες όπως η μέση ετήσια βροχόπτωση και ο λόγος της πραγματικής εξάτμισης προς βροχόπτωση, τα οποία μπορούν να επηρεάσουν μακροπρόθεσμα την υγρασία του εδάφους (Merz & Blöschl, 2009; Huang et al., 2016).

Ο συντελεστής απορροής αυξάνεται με την αύξηση της δασικής κάλυψης μετά από μεγάλες πλημμύρες και μειώνεται με τη μείωση της δασικής κάλυψης μετά από μικρές πλημμύρες (Sriwongsitanon & Taesombat, 2011). Το τοπίο είναι ένας σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει τις υδρολογικές διεργασίες και τον κύκλο του νερού σε μια λεκάνη απορροής (Shi et al., 2013; Tarasova et al., 2018). Ο δείκτης τοπίου είναι ένας ποσοτικός δείκτης που αντικατοπτρίζει τη δομή και τη χωρική κατανομή της χρήσης γης, παρέχει έναν εξαιρετικά συμπυκνωμένο τρόπο αξιολόγησης πληροφοριών σχετικά με τα χαρακτηριστικά του τοπίου. Πολλοί μελετητές το χρησιμοποιούν για να ποσοτικοποιήσουν τη σχέση μεταξύ των προτύπων χρήσης γης, της απορροής και της απόδοσης ιζήματος (Tang et al., 2011; Borrelli et al., 2017).

4.3. Τεχνολογίες για τον Έλεγχο της Απορροής

Με την ταχεία ανάπτυξη της αστικοποίησης, οι αδιαπέρατοι δρόμοι έχουν αυξηθεί σημαντικά τις τελευταίες δεκαετίες, γεγονός που συνήθως αυξάνει τον κίνδυνο πλημμυρών

από καταγίδες και απειλεί την ασφάλεια οδήγησης, η οποία μπορεί επίσης να οδηγήσει σε καταστροφές αστικών υδάτων λόγω της ανεξέλεγκτης βροχοπτώσης όταν σημειώνονται έντονες βροχοπτώσεις (Kramer, 2013). Όσον αφορά την περιβαλλοντική βελτίωση και τη μείωση των περιβαλλοντικών καταστροφών, ορισμένοι μελετητές υποστήριξαν τη στρατηγική της «πόλης του σφουγγαριού» και ισχυρίστηκαν ότι η πόλη πρέπει να μιμηθεί το σφουγγάρι με καλή «ελαστικότητα» και «ανθεκτικότητα» (Guo et al., 2019).

Το διαπερατό πεζοδρόμιο (PP), ως τεχνολογία βιώσιμης ανάπτυξης χαμηλών επιπτώσεων (LID), έχει γίνει μία από τις σημαντικές τεχνικές για την επίτευξη της στρατηγικής της «πόλης σφουγγαριού» και έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως σε πολλές περιοχές αστικής ανάπτυξης (Drake & Bradford, 2013). Γενικά, τα συστήματα PP αποτελούνται από πολλαπλά στρώματα, όπως η επιφάνεια και η βάση. Το επιφανειακό στρώμα μπορεί να αποτελείται από διαπερατό ασφαλικό μίγμα (PAM) ή διαπερατό τσιμεντομπετόν (PCC) με μεγάλο βαθμό διαπερατότητας (Kuang et al., 2011). Συνήθως, χρησιμοποιείται για να σχηματίσει τη βάση, η οποία έχει μια λειτουργία προσωρινής αποθήκευσης για τη μείωση της αιχμής απορροής και της διάρκειάς της (Huang et al., 2017). Λόγω των διάφορων επιδράσεων ελέγχου διαφορετικών τύπων δομής στους δείκτες απορροής, η PP έχει γίνει μια ευρέως χρησιμοποιούμενη τεχνολογία για τον έλεγχο της απορροής. Δύο είδη μεθόδων χρησιμοποιούνται κυρίως για την ανάλυση της μείωσης της απορροής: η καθιέρωση του μοντέλου προσομοίωσης απορροής και η παρακολούθηση των πειραμάτων πεδίου (Gülbas & Kazezyilmaz-Alhan, 2017; Kim et al., 2018). Οι Zhang & Guo (2015) διερεύνησαν την αξιοπιστία της μείωσης της απορροής PP χρησιμοποιώντας τη μονάδα LID στο μοντέλο διαχείρισης νερού καταγίδας (SWMM) με βάση τα δεδομένα βροχοπτώσεων της Ατλάντα. Οι Tuomela et al. (2019) ανέπτυξαν ένα μοντέλο απορροής σε κατοικημένες περιοχές χρησιμοποιώντας SWMM για να αξιολογήσουν τις επιπτώσεις 10 σεναρίων LID στη μείωση της αστικής απορροής.

Οι Yang et al. (2017) καθιέρωσαν ένα μοντέλο SWMM και ανέλυσαν την επίδραση μείωσης στην αστική απορροή με τρία μέτρα, πράσινη στέγη, PP και πράσινη ζώνη χαμηλού υψομέτρου, και τα αποτελέσματα της προσομοίωσης έδειξαν ότι η PP έχει αξιοσημείωτη

μείωση της απορροής. Οι Xie et al. (2017) χρησιμοποίησαν SWMM για να προσομοιώσουν την επιφανειακή απορροή ενός χωριού στο Jiangsu, στη συνέχεια ανέλυσαν το αποτέλεσμα μείωσης του PP κάτω από διαφορετικές περιόδους επανάληψης βροχοπτώσεων και διαπίστωσαν ότι το συνδυασμένο σύστημα (PP + φύτευση χόρτου) ήταν πιο αποτελεσματικό στη μείωση της απορροής από το ένα μόνο. Οι Jose et al. (2015) επεσήμαναν ότι το πλήρως διαπερατό οδόστρωμα έχει μεγάλη επίδραση στη μείωση του συνολικού βάθους απορροής και τη μέγιστη ροή, αλλά μικρή επίδραση στη συμπλήρωση των υπόγειων υδάτων. Οι Zhao et al. (2019) διαπίστωσαν ότι το PP διαδραμάτισε σημαντικό ρόλο στη μείωση της συνολικής απορροής και στην αναβολή της έναρξης της απορροής (εφεξής καλούμενη «χρόνος απορροής») και του χρόνου αιχμής, χρησιμοποιώντας SWMM. Οι Dreelin et al. (2006) δοκίμασαν το πλήρως διαπερατό πεζοδρόμιο σε δύο χώρους στάθμευσης και διαπίστωσαν ότι μπορεί να μειώσει περισσότερο από το 90% της επιφανειακής απορροής.

Προηγούμενες μελέτες επικεντρώθηκαν κυρίως στο αποτέλεσμα της μείωσης της απορροής των τύπων PP, ειδικά σε συστήματα αργής κυκλοφορίας (όπως χώροι στάθμευσης, πεζοδρόμια και κοινοτικές πλατείες). Επιπλέον, το PP και διάφορες εγκαταστάσεις LID (τάφροι φύτευσης γρασιδιού, δεξαμενές βιολογικής συγκράτησης, πράσινες στέγες, κ.λπ.) συνδυάζονταν πάντα για να διερευνήσουν το αποτέλεσμα μείωσης της απορροής ολόκληρης της εγκατάστασης LID, ενώ λίγες μελέτες έχουν διεξαχθεί για να διερευνηθεί η επίδραση μείωσης της απορροής σε τυπικές δομές PP στο οδόστρωμα.

Σε αυτή τη μελέτη, το SWMM χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση της επίδρασης μείωσης των τριών PP (επιφανειακή αποστράγγιση, αποθήκευση και αποστράγγιση βασικού στρώματος, πλήρως διαπερατό οδόστρωμα) στις παραμέτρους απορροής, συμπεριλαμβανομένου του συνολικού βάθους απορροής, της ροής αιχμής, του χρόνου αιχμής, του χρόνου απορροής, της διάρκειας απορροής και των συντελεστών απορροής, σε διαφορετικές περιόδους επανάληψης βροχοπτώσεων στο Χί'αν της Κίνας. Συνολικά, αυτή η έρευνα δημιούργησε πληροφορίες σχετικά με την επίδραση της ρύθμισης της μείωσης της απορροής των PP με διαφορετικές δομές, που θα βοηθήσουν τον σχεδιασμό και την εφαρμογή των PP για τον μετριασμό του προβλήματος της αστικής υπερυδάτωσης.

4.4.Βέλτιστες Πρακτικές Διαχείρισης Απορροών

Η ΕΡΑ ανέπτυξε μια κατευθυντήρια γραμμή που καθορίζει τα μέτρα διαχείρισης για τις πηγές μη σημειακής ρύπανσης στα παράκτια ύδατα. Τα κράτη με εγκεκριμένα προγράμματα διαχείρισης παράκτιων ζωνών απαιτείται να ενσωματώσουν τις κατευθυντήριες διαχείρισης ή πιο αυστηρά μέτρα διαχείρισης στα Προγράμματά τους για τον Έλεγχο Μη Σημειακών Πηγών Παράκτιας Ζώνης. Τα βασικά μέτρα διαχείρισης για δρόμους, αυτοκινητόδρομους και γέφυρες που προτείνονται από την ΕΡΑ περιλαμβάνουν τα ακόλουθα:

- Προστασία περιοχών που παρέχουν σημαντικά οφέλη στην ποιότητα του νερού ή είναι ιδιαίτερα επιρρεπείς στη διάβρωση ή την απώλεια ιζημάτων.
- Περιορισμός της ενόχλησης του εδάφους, όπως είναι ο καθαρισμός, η ταξινόμηση και κοπή γεμίματος για να μειωθεί η διάβρωση και απώλεια ιζημάτων.
- Περιορισμός διαταραχής των φυσικών χαρακτηριστικών αποστράγγισης και της βλάστησης.
- Τοποθέτηση δομών γεφυρών έτσι ώστε να προστατεύονται τα ευαίσθητα και πολύτιμα υδάτινα οικοσυστήματα.
- Προετοιμασία και εφαρμογή εγκεκριμένου σχεδίου ελέγχου της διάβρωσης.
- Διασφάλιση της σωστής αποθήκευσης και απόρριψης τοξικών υλικών.
- Ενσωμάτωση της πρόληψης της ρύπανσης στις διαδικασίες λειτουργίας και συντήρησης για τη μείωση των ρυπογόνων φορτίων στην επιφανειακή απορροή.
- Ανάπτυξη και εφαρμογή ελέγχων ρύπανσης απορροής για υπάρχοντα οδικά συστήματα για τη μείωση των συγκεντρώσεων και των όγκων ρύπων.

Τα μέτρα διαχείρισης, ως πρακτικό ζήτημα, μπορούν συχνά να επιτευχθούν με την εφαρμογή βέλτιστων πρακτικών διαχείρισης κατάλληλων για την πηγή της απορροής, τη θέση της απορροής και το κλίμα. Παραδείγματα βέλτιστων πρακτικών διαχείρισης για δρόμους, αυτοκινητόδρομους και γέφυρες περιλαμβάνουν:

- Αποφυγή τοποθεσιών αυτοκινητοδρόμων που απαιτούν πολλές διαβάσεις ποταμών ή υγροτόπων (για την επίτευξη του Μέτρου Διαχείρισης για Γέφυρες).

- Συντονισμός ελέγχων διάβρωσης και ιζημάτων με την Ομοσπονδιακή Διοίκηση Αυτοκινητοδρόμων (FHWA), την Αμερικανική Ένωση Υπαλλήλων Κρατικών Μεταφορών (AASHTO) και τις κρατικές οδηγίες (για την επίτευξη του Μέτρου Διαχείρισης για Κατασκευαστικά Έργα).
- Συλλογή και αφαίρεση τα υπολειμμάτων του δρόμου και επισκευή λακκουβών (για την επίτευξη του Μέτρου Διαχείρισης για Λειτουργία και Συντήρηση).

4.5. Αρχές Ελέγχου Απορροής για Δρόμους

Η πρόληψη της ρύπανσης από την απορροή από την κατασκευή δρόμων, αυτοκινητοδρόμων και γεφυρών σε παράκτιες περιοχές απαιτεί σχεδιασμό, εκπαίδευση, επιθεώρηση και συντήρηση. Ένα σχέδιο ελέγχου διάβρωσης και ιζημάτων (ESC) που ενσωματώνει τις πιο κατάλληλες και οικονομικά αποδοτικές βέλτιστες πρακτικές διαχείρισης (BMPs) είναι απαραίτητο για τον αποτελεσματικό έλεγχο της ρύπανσης. Το επηρεαζόμενο προσωπικό αυτοκινητοδρόμων πρέπει να εκπαιδευτεί σχετικά με τις απαιτήσεις του σχεδίου ESC. Οι αρχές επιθεώρησης και επιβολής είναι απαραίτητες για τη διασφάλιση της ευαισθητοποίησης και της συμμόρφωσης με τις υιοθετούμενες πρακτικές. Τέλος, τα BMP απαιτούν τακτική συντήρηση για να διασφαλιστεί η βέλτιστη απόδοσή τους. Οι ακόλουθες αρχές ισχύουν για ένα αποτελεσματικό πρόγραμμα ελέγχου της διάβρωσης και της απορροής.

- **Ανάπτυξη ολοκληρωμένου σχεδίου ελέγχου της διάβρωσης και των ιζημάτων (ESC) πριν από τις χωματουργικές δραστηριότητες. Καταγραφή απαιτήσεων ESC σε σχέδια, προδιαγραφές και εκτιμήσεις κόστους για έργα αυτοκινητοδρόμων και γεφυρών.** Τέσσερις βασικοί παράγοντες επηρεάζουν τη δυνατότητα διάβρωσης του εδάφους από μια τοποθεσία: χαρακτηριστικά του εδάφους, φυτική κάλυψη, τοπογραφία και κλίμα. Λάβετε υπόψη όλους αυτούς τους παράγοντες για να αναπτύξετε ένα σχέδιο ESC που θα ελαχιστοποιήσει την απώλεια εδάφους, θα περιορίσει την περιοχή που εκτίθεται στην κατασκευή, θα μεγιστοποιήσει τη φυτική κάλυψη, θα χρησιμοποιήσει τα φυσικά τοπογραφικά

χαρακτηριστικά προς το καλύτερο και θα περιλαμβάνει BMPs κατάλληλα για το περιφερειακό κλίμα. Το Πρόγραμμα Βοήθειας Τοπικής Βοήθειας της Ομοσπονδιακής Διοίκησης Αυτοκινητοδρόμων, η Ένωση Υπαλλήλων Αυτοκινητοδρόμων και Μεταφορών της Αμερικανικής Πολιτείας και πολλά τμήματα πολιτειακών αυτοκινητοδρόμων μπορούν να παρέχουν οδηγίες ESC.

- **Χρήση ESC και BMPs για έλεγχο ροής του νερού απορροής και αποτροπή ή μείωση της διάβρωσης του εδάφους.** Ο περιορισμός της διατάραξης της γης και η διατήρηση της φυσικής βλάστησης είναι εξαιρετικές πρακτικές ESC.
- **Εφαρμογή πρακτικών περιμετρικού ελέγχου για την προστασία της διαταραγμένης περιοχής από απορροή εκτός του χώρου και για την αποφυγή ζημιών από καθίζηση σε περιοχές κάτω από το εργοτάξιο.** Ένα φράγμα ιζημάτων και απορροής που περιβάλλει την διαταραγμένη περιοχή εμποδίζει την απορροή του εργοταξίου να μετακινηθεί εκτός του χώρου και να ρυπάνει τα επιφανειακά ύδατα.
- **Διατήρηση χαμηλών ταχυτήτων απορροής.** Η διαβρωτική ισχύς της απορροής αυξάνεται δραματικά όσο αυξάνεται η απόσταση και η κλίση. Τα BMPs μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον αποτελεσματικό έλεγχο της ταχύτητας απορροής και τη συγκράτηση της για την απομάκρυνση του 80 έως 90 τοις εκατό του ιζήματος από την απορροή.
- **Σταθεροποίηση διαταραγμένων περιοχών αμέσως μετά την επίτευξη του τελικού βαθμού.** Κάθε εκτεθειμένο έδαφος υπόκειται σε διάβρωση από βροχοπτώσεις, άνεμο και οχήματα. Τα BMP για τη σταθεροποίηση του εδάφους θα πρέπει να εφαρμόζονται όσο το δυνατόν γρηγορότερα μετά τη διατάραξη του εδάφους. Οι προσωρινές πρακτικές σταθεροποίησης περιλαμβάνουν κουβέρτες ή ψάθες σποράς, επικάλυψης και ελέγχου της διάβρωσης.
- **Ανάπτυξη χρονοδιαγράμματος και εφαρμογή ολοκληρωμένου προγράμματος επιθεώρησης και συντήρησης.** Αυτή η αρχή είναι ζωτικής σημασίας για την επιτυχία του ελέγχου της διάβρωσης. Τα BMP πρέπει να υποβάλλονται σε τακτική

επιθεώρηση και συντήρηση για να διασφαλίζεται ότι λειτουργούν αποτελεσματικά και βέλτιστα, τόσο κατά τη διάρκεια όσο και μετά την κατασκευή.

5. Βιώσιμα Αστικά Συστήματα Συλλογής και Διαχείρισης Όμβριων Υδάτων σε Οδικά Δίκτυα

5.1. Η Έννοια της Βιώσιμης Οδικής Αποστράγγισης

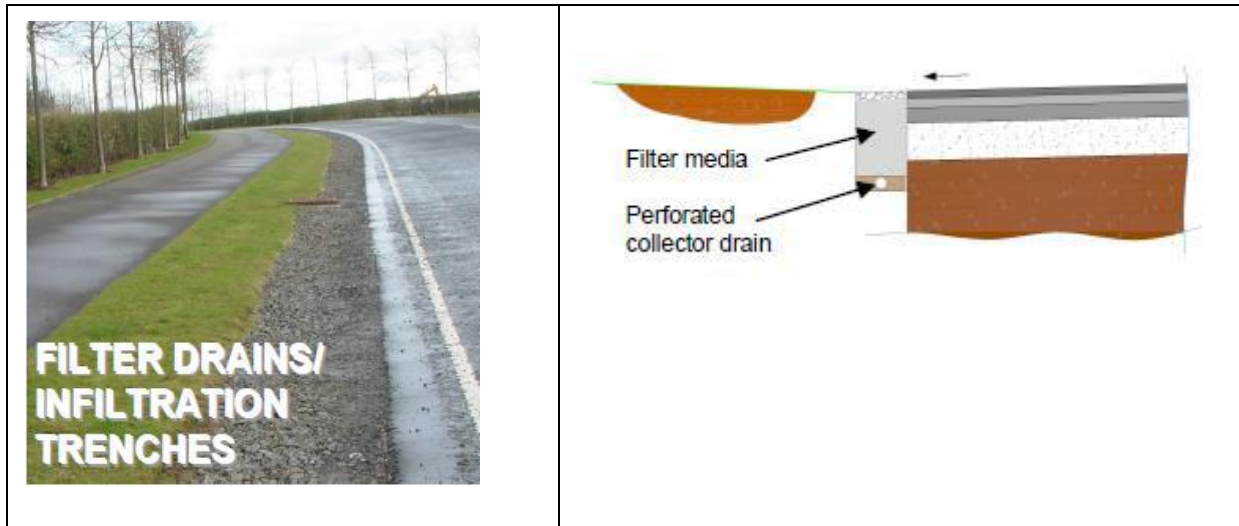
Σκοπός της αποστράγγισης του δρόμου είναι να αποστραγγίζει τα ύδατα απορροής μέσω καναλιού και να τα οδηγεί στον ποταμό. Συνεπώς είναι απαραίτητο ένα κανάλι αποστράγγισης με επαρκείς διαστάσεις και χωρητικότητα για τη μεταφορά της απορροής του νερού. Εάν το παραπάνω δεν επιτευχθεί, αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα την ελλιπή αποστράγγιση δρόμου και κατ' επέκταση σε ορισμένες περιπτώσεις την πρόκληση ζημιών στο οδόστρωμα. Η βροχή που πέφτει στο δρόμο και φυσικά στην ευρύτερη περιοχή αυτού, δημιουργεί απορροή για την οποία θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη τόσο το επίπεδο ποσότητας όσο και το επίπεδο ποιότητας. Όσον αφορά την ποσότητα, η υψηλή βροχόπτωση θα αυξήσει τον όγκο της επιφανειακής ροής και θα δημιουργήσει λακκούβες εφόσον το σύστημα αποχέτευσης δεν λειτουργεί σωστά. Η υπερχείλιση ωστόσο φαίνεται να παρουσιάζει τη μεγαλύτερη επίδραση στο επιφανειακό στρώμα των αδρανών και έχει δράση αντισυγκολλητική αφού το νερό προκαλεί την απελευθέρωση των αδρανών από την άσφαλτο στο επιφανειακό στρώμα (Chairuddin, 2013). Η ποιότητα του βρόχινου νερού που πέφτει στο δρόμο είναι χαμηλότερη αφού εξ' αιτίας των οχημάτων αυτό περιέχει εκπομπές καυσαερίων. Για παράδειγμα τα αποτελέσματα των μετρήσεων των συγκεντρώσεων βαρέων μετάλλων στα όμβρια ύδατα απορροής τεκμηριώνουν την παρουσία καδμίου, χαλκού και ψευδάργυρο. Το βιώσιμο σύστημα αποχέτευσης αποτελεί σύστημα αποχέτευσης που, εκτός από το ότι στοχεύει στη μείωση των προβλημάτων που προκαλούνται από την επιφανειακή απορροή, στοχεύει επίσης στη μείωση του προβλήματος της ρύπανσης των υδάτων, στην ανακύκλωση των υδάτινων πόρων και στην αύξηση της αξίας χρήσης του νερού, ειδικά σε αστικά περιβάλλοντα. Η οικολογική αποστράγγιση αποτελεί μία ιδέα που σκοπεύει να υποστηρίξει ένα βιώσιμο σύστημα αποχέτευσης σε αστικές περιοχές, ειδικά στις αναπτυσσόμενες χώρες¹.

¹ Parkinson, J., dan Mark, O. 2005, *Urban Stormwater Management in Developing Countries*, IWA Publishing.

Το αειφόρο αποχετευτικό σύστημα των ομβρίων υδάτων είναι μία από τις χρήσεις του αποχετευτικού συστήματος σε αστικές περιοχές που λειτουργεί για τη διαχείριση των επιφανειακών υδάτων έτσι ώστε να μην προκαλούνται προβλήματα με πλημμύρες ή με ξηρασία για την κοινότητα, και είναι ευεργετικό για την περιβαλλοντική βιωσιμότητα. Υπάρχει μια ειδοποιός διαφορά ανάμεσα σε ένα συμβατικό σύστημα αποχέτευσης και σε ένα σύστημα αποχέτευσης που αποστραγγίζει απευθείας το νερό προς την οικολογική αποχέτευση. Η αρχή της οικολογικής αποχέτευσης αφορά τη βελτίωση της ποιότητας του νερού στο σύστημα αποχέτευσης, τη μείωση του φορτίου αποχέτευσης και τη συμμετοχή της κοινότητας στη διαχείριση της υποδομής αποχέτευσης (Yunianta et al., 2020). Το φιλικό προς το περιβάλλον ή βιώσιμο σύστημα αποχέτευσης οδών στο οποίο η απορροή επιφανειακών υδάτων διεισδύει μέσω μιας ολοκληρωμένης τεχνητής εγκατάστασης αποτελείται από πλευρικά κανάλια, στρώματα φίλτρων και φρεάτια διείσδυσης, αντί να διατίθεται μέσω πλευρικού καναλιού στο υδάτινο σώμα ((Yunianta & Setiadji, 2018).

Συνεπώς, ένα βιώσιμο αστικό σύστημα αποστράγγισης (SUDS) αναπτύχθηκε για να δημιουργήσει ένα μοντέλο συστήματος αποστράγγισης που απορροφά το νερό απορροής στο έδαφος το οποίο συχνά αναφέρεται ως διήθηση. Αυτό το σύστημα διήθησης οδηγεί το νερό απορροής στο κανάλι αποστράγγισης και υποβάλλεται σε επεξεργασία με ένα φίλτρο για να φιλτράρει τους ρύπους ή τα απόβλητα που υπάρχουν στο νερό απορροής. Το σύστημα φιλτραρίσματος χρησιμοποιεί γεω-υφάσματα ή άλλα μέσα ως φίλτρα ρύπων (Golio, 2000).

Οι Αποχετεύσεις/Τάφροι διείσδυσης Φιλτράρισμα Αποχετεύσεων/Διηθητικές τάφροι χρησιμοποιούν συστήματα αποστράγγισης στη δεξιά και την αριστερή πλευρά του δρόμου ως διαπερατά μέσα που μπορούν να απορρίψουν το νερό στο δρόμο και να πραγματοποιήσουν προσωρινή επεξεργασία νερού πριν αυτό αποστραγγιστεί στο έδαφος, όπως φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα.



Εικόνα 1: Μοντέλα Αποχετεύσεων Φίλτρου Αποστράγγισης – Τάφροι διήθησης. Πηγή:
(Chahar et al., 2012)

5.2.Υδρολογική Απόδοση Συστημάτων Βιώσιμης Αποστράγγισης (SuDS) στην Άκρη του Δρόμου

Τα “Αειφόρα Συστήματα Αποστράγγισης (Sustainable Drainage Systems - SuDS)” αποτελούν μια πολλά υποσχόμενη λύση για την αύξηση της απορροφητικότητας αφού μειώνουν τους όγκους απορροής νερού και τους ρυθμούς ροής και βελτιώνουν την ποιότητα του. Ωστόσο, η απόδοση αυτών των συστημάτων εξαρτάται από τις υδραυλικές και φυσικές ιδιότητες του εδάφους, οι οποίες με τη σειρά τους είναι χωρικές μεταβλητές. Η μεταβλητότητα αυτή έχει τεκμηριωθεί για τις αστικές περιοχές, ειδικά για το SuDS στην άκρη του δρόμου. Στη μελέτη των (Kanso et al., 2018), η χωρική μεταβλητότητα των υδραυλικών ιδιοτήτων του εδάφους, μαζί με την αβεβαιότητα αυτών των ιδιοτήτων λόγω των μεθόδων εκτίμησης, διερευνήθηκαν για τρία οδικά SuDS στη Γαλλία (περιοχή του Παρισιού). Οι μέθοδοι εκτίμησης βασίστηκαν τόσο σε επιτόπιες δοκιμές διήθησης όσο και σε συναρτήσεις pedotransfer (PTF). Τα αποτελέσματα έδειξαν υψηλή χωρική μεταβλητότητα στην κορεσμένη υδραυλική αγωγιμότητα K_s (έως και 160% συντελεστής διακύμανσης), η οποία είναι κυρίαρχη σε σχέση με την αβεβαιότητα στις προβλέψεις των PTF και εκείνων

που προκαλούνται από πειραματικά σφάλματα. Πολλοί συγκεκριμένοι παράγοντες μπορεί να ευθύνονται για αυτή τη μεταβλητότητα, ειδικά στο αστικό περιβάλλον, όπως οι κατασκευαστικές τεχνικές, η καταβύθιση (precipitation) CaCO_3 και η ανάπτυξη της βλάστησης. Προκειμένου να αξιολογηθούν τα αποτελέσματα αυτής της μεταβλητότητας στην υδρολογική απόδοση, δοκιμάστηκε ένα υδρολογικό μοντέλο κυττάρου βιοκατακράτησης. Οι προσομοιώσεις αποκάλυψαν ότι οι μέγιστες ροές και οι όγκοι επηρεάζονται σε μεγάλο βαθμό από τη χωρική μεταβλητότητα των υδραυλικών ιδιοτήτων του εδάφους. Συγκεκριμένα, η κατακόρυφη μεταβλητότητα αυξάνει την υπερχειλίση κατά 50%. Ο αριθμός των μετρήσεων διήθησης που απαιτούνται για την αξιολόγηση ενός αντιπροσωπευτικού μέσου όρου K_s με αβεβαιότητα συντελεστή δύο ή μικρότερη βρέθηκε να είναι τέσσερις/οκτώ, ανάλογα με την περιοχή που μελετήθηκε.

Οι αυξημένες αδιαπέραστες επιφάνειες, λόγω της αστικής ανάπτυξης, έχουν αρνητικό αντίκτυπο στα υδρολογικά και ποιοτικά χαρακτηριστικά του νερού της απορροής των ομβρίων (Liu et al., 2012). Προκειμένου να μετριαστούν οι επιπτώσεις που προκύπτουν από τη δημιουργία απορροής και συναφών ρυπογόνων φορτίων, τα αειφόρα αστικά συστήματα αποχέτευσης (SuDS) εφαρμόζονται ευρέως για τη διαχείριση των ομβρίων υδάτων. Τα SuDS στοχεύουν στην μεταφορά του κύκλου του νερού πίσω στη φυσική του κατάσταση μειώνοντας τους όγκους απορροής, μετριάζοντας τις κορυφαίες ροές και βελτιώνοντας την ποιότητα του νερού, μέσω διαφόρων διαδικασιών, συμπεριλαμβανομένης της διήθησης και της εξατμισοδιαπνοής. Αυτές οι πρακτικές περιλαμβάνουν ταινίες φίλτρου, χλοοτάπητες, εγκαταστάσεις βιοπροστασίας, πράσινες στέγες, διαπερατά πεζοδρόμια και συστήματα επεξεργασίας νερού. Οι λωρίδες φίλτρου είναι διαμήκεις, διαπερατές με επιφάνειες από χλοοτάπητες κάθετες προς την κατεύθυνση της απορροής. Τα swales είναι ρηγά χαντάκια με βλάστηση και οι εγκαταστάσεις βιοσυντήρησης αποτελούνται από ένα μέσο φίλτρου με κάλυμμα με βλάστηση (Davis, 2008). Αυτά τα τρία συστήματα χρησιμοποιούνται συνήθως δίπλα σε δρόμους και αυτοκινητόδρομους.

Η ανάλυση των φυσικών και υδραυλικών ιδιοτήτων του εδάφους είναι και οι δύο θεμελιώδεις για την αξιολόγηση της υδρολογικής απόδοσης SuDS (Rezaei et al., 2016). Το

παραπάνω τονίζει τη σημασία της απόκτησης αξιόπιστης εκτίμησης αυτών των παραμέτρων. Οι φυσικές ιδιότητες (υφή, πυκνότητα όγκου, πορώδες, δομή, κ.λπ.) μπορούν να προσδιοριστούν εύκολα, αλλά οι υδραυλικές ιδιότητες όπως οι καμπύλες συγκράτησης νερού και διαπερατότητας, ή ακόμα και η κορεσμένη υδραυλική αγωγιμότητα K_s , είναι πιο περίπλοκες στην αξιολόγηση. Μπορούν να προβλεφθούν από τις φυσικές ιδιότητες του εδάφους μέσω συναρτήσεων pedotransfer (PTFs), που προέρχονται από εργαστηριακά πειράματα ή από μετρήσεις στο πεδίο (Jhorar et al., 2004). Αν και οι τεχνικές πεδίου είναι πιο δύσκολες στην εφαρμογή τους, θεωρούνται συχνά πιο ακριβείς σε σχέση με άλλες μεθόδους, επειδή οι υδραυλικές ιδιότητες του εδάφους είναι γενικά συγκεκριμένες για την τοποθεσία (Reynolds, 2002).

Μελέτες έχουν δείξει ότι οι φυσικές και υδραυλικές ιδιότητες μπορεί να είναι εξαιρετικά μεταβλητές στο διάστημα, ακόμη και στην κλίμακα μιας μεμονωμένης λωρίδας βιοκατακράτησης ή φυτικής λωρίδας φίλτρου (Weiss & Gulliver, 2015). Ενώ η χωρική μεταβλητότητα των υδραυλικών ιδιοτήτων του εδάφους έχει αντιμετωπιστεί ευρέως στη βιβλιογραφία για γεωργικά πεδία και σε μεγάλη κλίμακα (Jabro et al., 2016), μόνο λίγες μελέτες έχουν επικεντρωθεί σε αυτή τη μεταβλητότητα στα αστικά περιβάλλοντα. Επιπλέον, το SuDS στην άκρη του δρόμου, που συνεπάγεται πρόσθετες πηγές μεταβλητότητας, όπως κατασκευαστικές πρακτικές, τεχνικές συντήρησης και φυτική κάλυψη (Mubarak et al., 2010), πάσχει από αξιοσημείωτη έλλειψη τεκμηρίωσης.

Το γεγονός ότι οι υδραυλικές ιδιότητες είναι βασικά χαρακτηριστικά για την περιγραφή των ροών νερού και της μεταφοράς διαλυμένων ουσιών εντός του εδάφους (Rienzner & Gandolfi, 2014) θέτει διάφορα ερωτήματα όπως:

- ποιοι είναι οι παράγοντες που ελέγχουν τη χωρική μεταβλητότητα αυτών των παραμέτρων στο SuDS στην άκρη του δρόμου
- πόσο ακριβείς είναι οι συναρτήσεις pedotransfer στην πρόβλεψη αυτών των παραμέτρων

- εάν η χωρική μεταβλητότητα είναι κυρίαρχη σε σχέση με τις άλλες πηγές αβεβαιοτήτων
- πόσες μετρήσεις απαιτούνται για την προσέγγιση της μέσης τιμής του K_s που προκύπτει από μεγάλο αριθμό μετρήσεων
- σε ποιο βαθμό ένας περιορισμένος αριθμός μετρήσεων, οι προβλεπόμενες τιμές της συνάρτησης pedotransfer και η εγγενής χωρική μεταβλητότητα θα μπορούσαν να επηρεάσουν τις προβλέψεις των υδρολογικών διεργασιών στην κλίμακα ενός συστήματος διήθησης.

5.3.Συστήματα Αειφόρου Αποστράγγισης (Sustainable drainage systems (SuDS))

Ο σχεδιασμός συστημάτων αειφόρου αποστράγγισης (Sustainable drainage systems, SuDS) δρόμων, πρέπει να διασφαλίσει την προστασία του οδοστρώματος από ζημιές και να μην εισάγει κινδύνους για την ασφάλεια. Επίσης θα πρέπει να υπάρχει συνεργασία μεταξύ των σχεδιαστών δρόμων και του SuDS για την επίτευξη των πιο αποτελεσματικών σχεδίων.

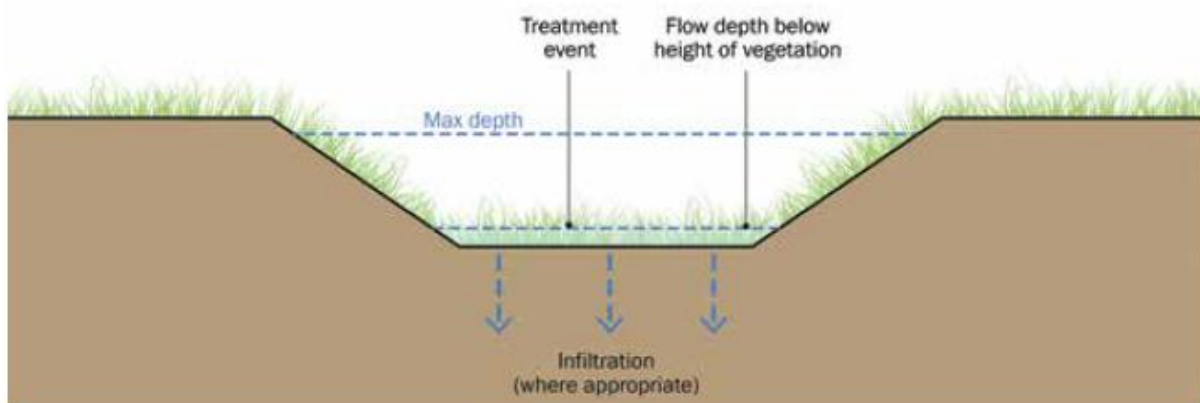
Η διάταξη των υπόγειων υποδομών κοινής ωφέλειας (π.χ. σωληνώσεις, καλωδιώσεις, οπτικές ίνες) θα πρέπει να ληφθεί υπόψη κατά το σχεδιασμό SuDS. Οι υποδομές θα πρέπει να βρίσκονται σε διαδρόμους, να είναι χαρτογραφημένες και οι σχεδιαστές του SuDS θα πρέπει να γνωρίζουν την παρουσία τους. Για παράδειγμα, η χρήση διαπερατών επιφανειών πάνω από υπόγειες υποδομές κοινής ωφέλειας, μπορεί να μην είναι κατάλληλη σε δρόμο όπου η ανεξέλεγκτη εκσκαφή από εταιρείες κοινής ωφέλειας θα μπορούσε να βλάψει το σύστημα και να οδηγήσει σε πλημμύρες. Αντίθετα, υπάρχουν πολλοί μεγάλοι εμπορικοί χώροι όπου έχουν κατασκευαστεί διαπερατές οδοστρώσεις από τσιμεντόλιθους πάνω από υπόγειες υποδομές χωρίς προβλήματα. Η παρουσία υποδομών κάτω από το δρόμο θα έχει ως αποτέλεσμα το σύστημα απορροής επιφανειακών υδάτων κάτω από το δρόμο (συνήθως ένας αγωγός) να έχει βάθος τουλάχιστον 1 m, ώστε να είναι κάτω από τις υπόγειες υποδομές και έτσι να ελαχιστοποιείται ο κίνδυνος ζημιάς από εκσκαφές.

5.3.1. Εφαρμογή SUDS για Αποστράγγιση Δρόμων

Μερικά από τα στοιχεία που χρησιμοποιούνται σε συστήματα αειφόρου αποστράγγισης δρόμου είναι τα ακόλουθα:

Οι **τάφροι απορροής (swales)** είναι ένα είναι ένα ρηχό κανάλι με ελαφρά κεκλιμένες πλευρές που βρίσκεται δίπλα στον αυτοκινητόδρομο. Ένα τέτοιο στοιχείο μπορεί να είναι

είτε φυσικό είτε ανθρωπογενές. Οι τεχνητές τάφροι είναι συχνά λεκάνες διήθησης, σχεδιασμένες για να διαχειρίζονται την απορροή του νερού, να φιλτράρουν τους ρύπους και να αυξάνουν τη διείσδυση του βρόχινου νερού. Οι βιολογικές τάφροι απορροής (bioswales) περιλαμβάνουν τη συμπερίληψη φυτών ή βλάστησης στην κατασκευή τους. Οι τάφροι απορροής είναι εξαιρετικά χρήσιμη μέθοδος για την αποστράγγιση μεγάλων τμημάτων δρόμου, στις περιπτώσεις όπου ο δρόμος είναι κοντά στο υπάρχον επίπεδο του εδάφους και υπάρχουν λίγες υπόγειες υποδομές δίπλα στο δρόμο ή που διασχίζουν το δρόμο.



Σχ. 1 Σχέδιο τυπικής τάφρου απορροής Πηγή: (Woods-Ballard et al., 2007)



Σχ. 2. Τάφρος απορροής και υγρότοπος. Πηγή: (Woods-Ballard et al., 2007).

Οι λεκάνες κράτησης (**detention basins**), και υγροτόποι (**wetlands**) είναι στοιχεία κατάλληλα για κόμβους ή κυκλικούς κόμβους (roundabouts), και χρησιμοποιούνται επίσης εκτενώς σε αυτοκινητόδρομους και στο οδικό δίκτυο, όπου υπάρχει χώρος σε ανοιχτή

ύπαιθρο. Βασικός στόχος των στοιχείων αυτών είναι η καθυστέρηση και άρα η μείωση της παροχής αιχμής.

Το Σχ.1 δείχνει ένα σύστημα τάφρου αποροροής και υγροτόπων δίπλα σε δρόμο. Σε ορισμένα σημεία τα επιφανειακά ύδατα τρέχουν απευθείας από την επιφάνεια του δρόμου μέσα στην τάφρο. Σε άλλα ακραία κανάλια συλλέγονται και απορρίπτονται στην τάφρο (π.χ. από περιοχές δρόμου σε χαμηλά αναχώματα όπου το νερό που ρέει κάτω από τις πλαγιές μπορεί να προκαλέσει αστάθεια και σε άλλα (όπου απαιτούνται κράσπεδα) η αποστράγγιση του κράσπεδου συλλέγει επιφανειακά νερά τα οποία απορρίπτει στην τάφρο.

Η λεκάνη κράτησης που φαίνεται στο Σχ. 2, αποστραγγίζει έναν αγροτικό δρόμο, έχει απλές εισόδους κράσπεδου σε μια ζώνη φίλτρου λάσπης. Το χαμηλό γρασίδι γύρω από τις άκρες διασφαλίζει τη διατήρηση των γραμμών του χώρου. Επίσης υπάρχει η δυνατότητα αποστράγγισης και άλλων περιοχών στη λεκάνη μέσω σωληνώσεων. Στο Σχ. 3 φαίνεται ένας υγρότοπος για αποστράγγιση δρόμου.



Σχ. 3. Λεκάνη κράτησης για αποστράγγιση δρόμου. Πηγή: (Woods-Ballard et al., 2007).



Σχ. 4. Υγρότοπος για αποστράγγιση δρόμου. Πηγή: (Woods-Ballard et al., 2007)



Σχ. 5. Σύστημα βιοπροστασίας. Πηγή: (Woods-Ballard et al., 2007).

Τα **συστήματα βιοπροστασίας (bioretention systems)** μπορούν να τοποθετηθούν σε χώρους κατασκευής δρόμων ως χαρακτηριστικά ηρεμίας της κυκλοφορίας και σε χώρους στάθμευσης ή περιστροφές, παρέχοντας οφέλη άνεσης και βιοποικιλότητας σε αστικές περιοχές, όπως φαίνεται στο Σχ. 4.



Σχ. 6. Εγκατάσταση διαχωριστή δίνης. Πηγή: (Woods-Ballard et al., 2007)

Οι υδροδυναμικοί διαχωριστές δίνης (**vortex separators**) έχουν σχεδιαστεί για την αποτελεσματική σύλληψη και συγκράτηση αδιάλυτων σωματιδίων που μεταφέρονται με την απορροή επιφανειακών υδάτων, όπως λάσπη, άλλους επιφανειακούς ρύπους και ορισμένα έλαια. Οι διαχωριστές δίνης έχουν χρησιμοποιηθεί για την αντιμετώπιση της ρύπανσης στην απορροή του δρόμου. Ένας διαχωριστής λαδιού προηγείται μιας μεγάλης παγίδας ιζημάτων και οδηγεί σε ένα κανάλι καθίζησης και μια λεκάνη εξασθένησης. Σχτ Σχ. 5 φαίνεται η εγκατάσταση ενός διαχωριστή δίνης.

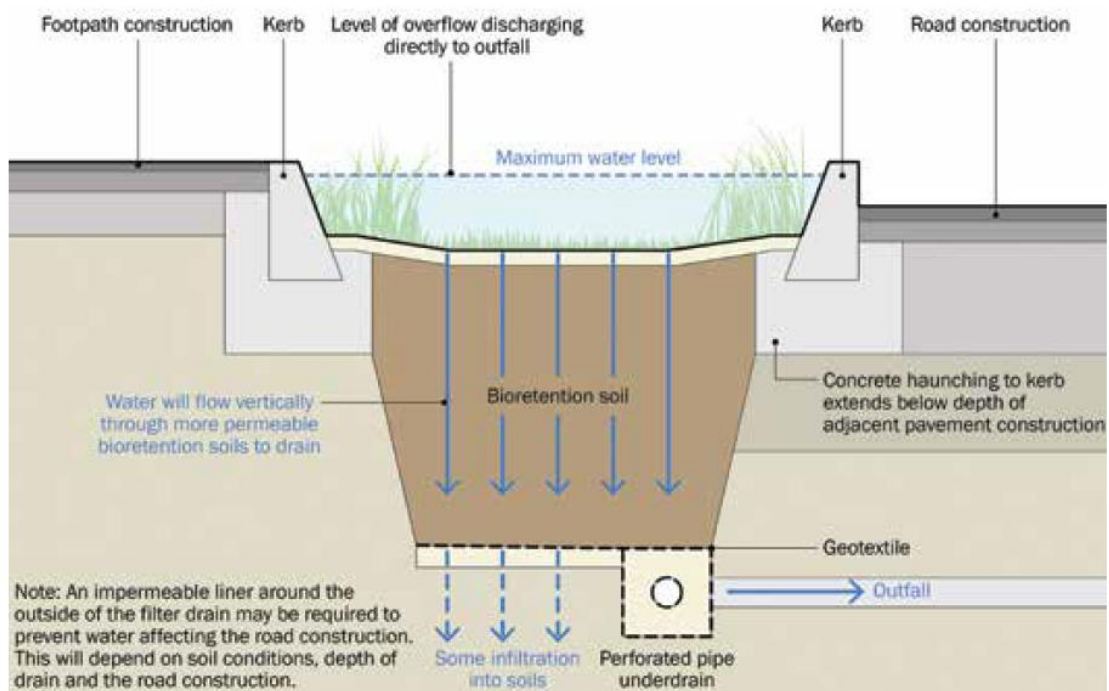
Η δεξαμενή εξασθένησης (**attenuation tank ή attenuation storage**) είναι μια κατασκευή (π.χ. εκσκαφή) που λειτουργεί ως ρυθμιστής για την αποθήκευση περίσσειας βρόχινου νερού και την απομάκρυνση του κινδύνου πλημμύρας με ελεγχόμενο τρόπο. Το υπερβολικό νερό της βροχής που συγκρατείται σε μια δεξαμενή εξασθένησης όμβριων υδάτων απελευθερώνεται στη συνέχεια με ελεγχόμενο ρυθμό. Η δεξαμενή εξασθένησης είναι κατάλληλη και για περιοχές με περιορισμένο χώρο. Μπορεί να συνδυαστεί με άλλα στοιχεία όπως η βιοκατακράτηση (bioretention) ή οι τάφροι απορροής. Υπάρχουν πολλά παραδείγματα όπου δεξαμενές εξασθένησης αποστράγγισης έχουν χρησιμοποιηθεί σε αυτοκινητόδρομους.

5.3.2. Διήθηση νερού

Τα υλικά του οδοστρώματος επηρεάζονται από την παρουσία νερού, σταδιακά εξασθενούν και δημιουργούνται ελαττώματα όπως οι λακκούβες. Τα SuDS που γειτνιάζουν με το οδοστρώμα θα πρέπει να αποτρέπουν τη διείσδυση νερού στο πεζοδρόμιο ή στα εδάφη κάτω από αυτό. Εάν τα βάθη των επιφανειακών υδάτων στα παρακείμενα εξαρτήματα αποστράγγισης διατηρούνται χαμηλά, τότε το νερό διείσδυσης θα ρέει προς τα κάτω και όχι πλάγια, και απλές λεπτομέρειες όπως αυτή που φαίνεται στο Σχ. 6 μπορούν να εμποδίσουν τη ροή του νερού στη διπλανή κατασκευή του οδοστρώματος.

Εάν υπάρχουν ανησυχίες σχετικά με τους κινδύνους που σχετίζονται με τη διείσδυση του νερού, οι τάφροι μπορεί να υποστραγγιστούν ώστε να λειτουργήσουν ως υπόγεια αποχέτευση στο πλάι του δρόμου, όπως φαίνεται στο Σχ. 7. Η πλευρική κλίση μπορεί να είναι 33% για πολύ ρηχούς δρόμους και δρόμους χαμηλής ταχύτητας, ενώ για ταχύτερους δρόμους μια

βαθύτερη κλίση 25% είναι πιο κατάλληλη για την αντιμετώπιση των προβλημάτων ασφάλειας.

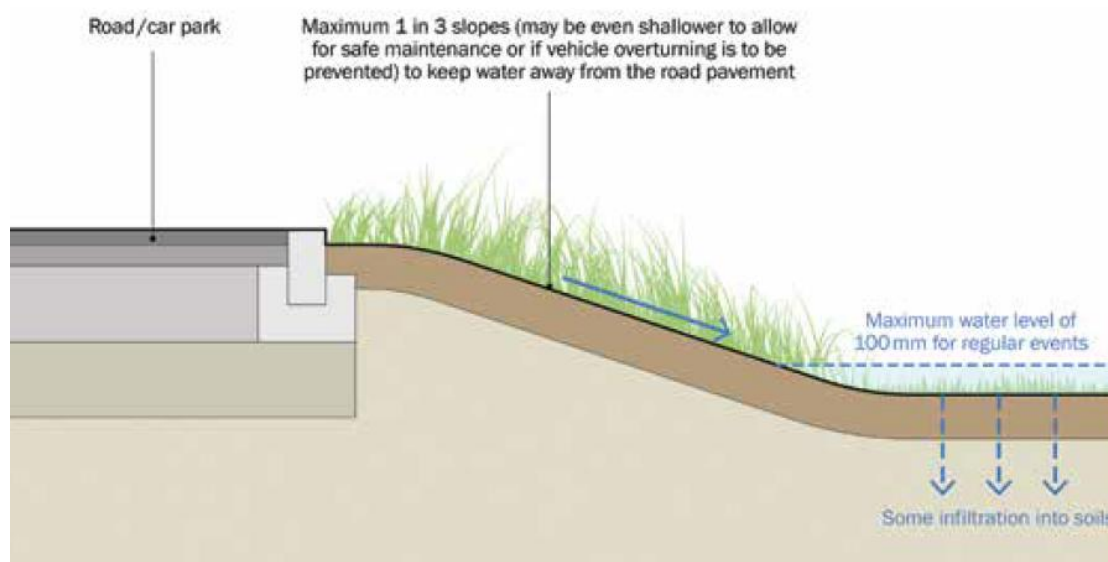


Σχ. 7. Λεπτομέρεια συστήματος βιοσυντήρησης. Πηγή: (Huidrom et al., 2013).

5.3.3. Φίλτρα στράγγισης (filter drains)

Ένα φίλτρο αποστράγγισης για δρόμους φαίνεται στο Σχ. 8. Το όριο μεταξύ της αδιαπέραστης περιοχής και της βλάστησης είναι το κλειδί για την επιτυχία αυτού του σχεδιασμού. Αυτό μπορεί να είναι μια περιοχή σημαντικής διάβρωσης, συσσώρευσης ιζημάτων και ρύπανσης που πρέπει να ληφθούν υπόψη στις απαιτήσεις σχεδιασμού και συντήρησης.

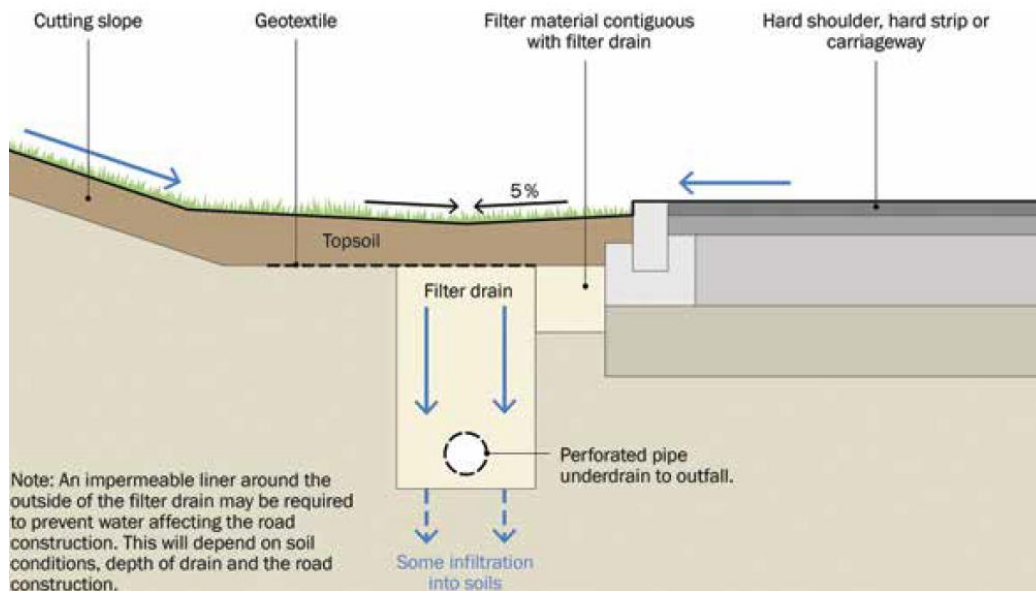
Όσο μεγαλύτερη είναι η απόσταση από την αποχέτευση του φίλτρου μέχρι το κύριο οδόστρωμα, τόσο λιγότερο είναι το πρόβλημα που προκαλείται από τη διασπορά πέτρας και τόσο λιγότερες είναι οι επιπτώσεις του νερού στο πεζοδρόμιο. Η αποχέτευση του φίλτρου μπορεί να επενδυθεί με μια αδιαπέραστη μεμβράνη για να αποτραπεί η είσοδος νερού στο παρακείμενο οδόστρωμα.



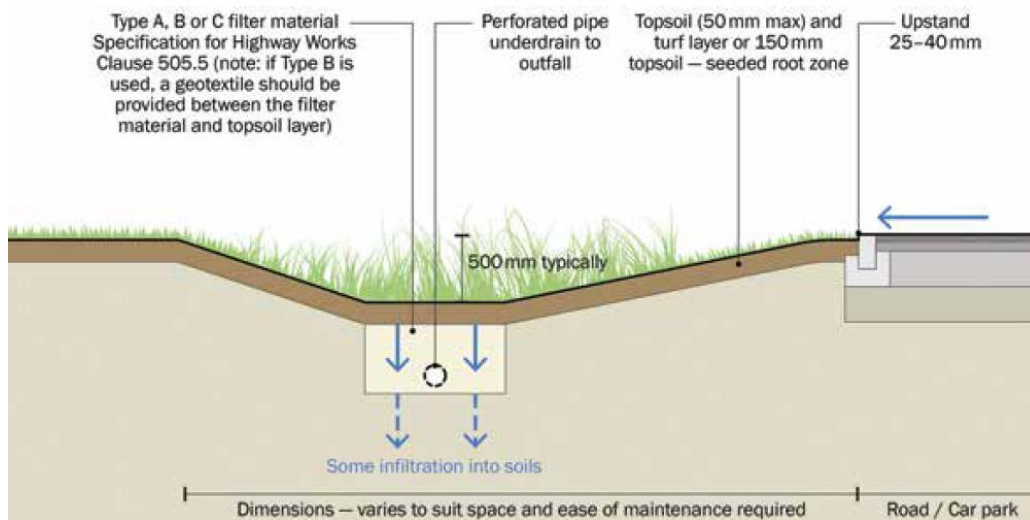
Σχ. 8. Απορροή νερού ρέει από ρηχές τάφρους που λειτουργούν ως ακραίες αποχετεύσεις για την υποβάθιση του δρόμου. Πηγή: (Huidrom et al., 2013).

5.3.4. Τάφροι για αποστράγγιση δρόμων

Μια γενική λεπτομέρεια των τάφρων φαίνεται στο Σχ. 9. Οι αποχετεύσεις από κράσπεδα μπορούν να είναι ένας αποτελεσματικός τρόπος συλλογής νερού από τις επιφάνειες των δρόμων και απόρριψής του σε ρηχά βάθη. Στο Σχ. 10 το νερό της οροφής από τα σπίτια εκκενώνεται στις αποχετεύσεις κρασπέδου που αποστραγγίζουν το δρόμο. Η αποστράγγιση του κρασπέδου ρέει στην αποχέτευση του καναλιού κατά μήκος του δρόμου, η οποία με τη σειρά της ρέει στον αγωγό στα δεξιά της εικόνας. Αυτό κρατά την τάφρο πολύ ρηχή.



Σχ. 9. Φίλτρο στράγγισης. Πηγή: (Huidrom et al., 2013).



Σχ.10. Λεπτομέρεια τάφρου απορροής. Πηγή: (Huidrom et al., 2013).

5.3.5. Δρόμοι για διαχείριση ροής υπέρβασης (Exceedance Flow)

Οι δρόμοι μπορούν να παρέχουν διαδρομές για ροές που υπερβαίνουν τη χωρητικότητα του συστήματος αποχέτευσης, όπως φαίνεται στο Σχ. 11. Οι δρόμοι μπορούν να σχεδιαστούν ή να τροποποιηθούν για να μεγιστοποιήσουν την υπέρβαση ροής μεταφοράς ή χωρητικότητας αποθήκευσης, αλλά απαιτείται μεγάλη προσοχή για να διασφαλιστεί ότι οι ροές δεν δημιουργούν προβλήματα περαιτέρω κατάντη και δεν αποτελούν κίνδυνο για τα οχήματα και τους πεζούς.



Σχ. 11. Αποστράγγιση από κράσπεδο και κανάλι συνδεδεμένο σε τάφρο. Πηγή: (Woods-Ballard et al., 2007)



Σχ. 12. Οδός που λειτουργεί ως διαδρομή πλημμύρας σε περίπτωση υπέρβασης Πηγή: (Woods-Ballard et al., 2007)

5.3.6. Απορροή δρόμων

Η εκκένωση των ρεμάτων, ο καθαρισμός δρόμων και άλλες εργασίες συντήρησης του δρόμου είναι σημαντικές στρατηγικές πρόληψης της ρύπανσης για την απορροή του δρόμου και η αντιμετώπιση της απορροής στην πηγή της ή κοντά στην πηγή της θα πρέπει να αποτελεί προτεραιότητα.

5.3.7. Σχεδιασμός ασφαλών SuDS δίπλα σε δρόμους

Οποιοδήποτε σύστημα αποστράγγισης πρέπει να είναι ασφαλές και υπάρχουν ειδικοί λόγοι ασφάλειας για στοιχεία που βρίσκονται δίπλα σε δρόμους. Ο κίνδυνος ανατροπής ενός

οχήματος και η ευκολία συντήρησης είναι τα κύρια ζητήματα που πρέπει να ληφθούν υπόψη όταν αποφασίζεται η κατάλληλη κλίση προς την πλευρά του στοιχείου. Η βλάστηση στο SuDS δεν πρέπει να παρεμβαίνει στις οπτικές γραμμές. Η βλάστηση στο κέντρο της λεκάνης κράτησης μπορεί να αφηθεί να αυξηθεί.

5.4.Σχεδιασμός SuDS Βάσει Ποσοτικών και Ποιοτικών Μεταβλητών των Υδάτων

Μία από τις τρέχουσες μεγάλες προκλήσεις στις αστικές περιοχές είναι η διαχείριση των ομβρίων υδάτων. Η απορροή που δημιουργείται σε αστικές περιοχές από τις καθημερινές δραστηριότητες αποτελεί έναν σημαντικό παράγοντα ρύπανσης των υδατικών συστημάτων υποδοχής. Οι ρύποι αυτού μεταξύ άλλων περιλαμβάνουν αιωρούμενα στερεά, οργανική ύλη, θρεπτικά συστατικά, μέταλλα, υδρογονάνθρακες, φυτοφάρμακα και παθογόνα (Woods et al., 2015). Ορισμένοι μάλιστα από αυτούς τους ρύπους περιλαμβάνονται στον ευρωπαϊκό κατάλογο επικίνδυνων ουσιών προτεραιότητας (2008/105/CE).

Παραδοσιακά, η διαχείριση των ομβρίων υδάτων στις πόλεις έχει επικεντρωθεί στη γρήγορη μεταφορά της απορροής από τις αστικές περιοχές, μέσω συνδυασμένων συστημάτων ή συστημάτων αποχέτευσης όμβριων υδάτων, σε μονάδες επεξεργασίας ή στα υδάτινα περιβάλλοντα των υδάτων υποδοχής (Castro-Fresno et al., 2013). Η συνδυασμένη αποχέτευση πάνω από ροές προκαλεί αρνητικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις στα υδατικά συστήματα, επομένως, σύμφωνα με την εφαρμογή της Οδηγίας Πλαίσιο για τα Ύδατα (2000/60/EC), οι διαχειριστές λεκανών απορροής αναζητούν τις πιο αποτελεσματικές λύσεις διαχείρισης των ομβρίων υδάτων. Επί του παρόντος, οι φιλοσοφίες διαχείρισης των ομβρίων υδάτων αλλάζουν και λαμβάνει χώρα μια μετάβαση σε πιο βιώσιμες και ολιστικές προσεγγίσεις (Perales Momparler et al., 2017). Τα αειφόρα αστικά συστήματα αποχέτευσης (SuDS) αντιπροσωπεύουν λύσεις βασισμένες στη φύση που χρησιμοποιούν φυσικές διαδικασίες για να μιμηθούν τον φυσικό κύκλο του νερού. Αν και η εφαρμογή τους αυξάνεται σε όλο τον κόσμο, η πρακτική εμπειρία στην εφαρμογή αυτών των συστημάτων σε ημίξηρες περιοχές εξακολουθεί να είναι περιορισμένη, κυρίως λόγω της αβεβαιότητας σχετικά με την αποτελεσματικότητά τους υπό κλιματικές συνθήκες παρατεταμένων ξηρών περιόδων που ακολουθούνται από καταρρακτώδη βροχή. Έχει αναπτυχθεί κάποια εμπειρία

στην περιοχή της Μεσογείου που συνίσταται στον χαρακτηρισμό της αστικής απορροής και των προτάσεων σχεδιασμού SuDS ή αξιολογήσεων απόδοσης κατασκευασμένων υγροτόπων για την αντιμετώπιση της απορροής των αυτοκινητοδρόμων (Lee et al., 2004).

Υπό αυτή την έννοια, είναι σημαντικό να έχουμε περισσότερες πληροφορίες για τα χαρακτηριστικά της αστικής απορροής σε αυτήν την κλιματική περιοχή, να προσαρμόσουμε τα κριτήρια σχεδιασμού ώστε να παρέχεται μεγαλύτερη βεβαιότητα για την εφαρμογή του SuDS και να επιταχυνθεί η μετάβαση προς νέα μοντέλα αστικού σχεδιασμού. Απαιτείται πρόσθετη γνώση της απορροής που παράγεται από συγκεκριμένους τύπους αστικών επιφανειών προκειμένου να βελτιστοποιηθεί ο σχεδιασμός των συστημάτων ελέγχου της ρύπανσης στην πηγή (Brodie & Dunn, 2010). Για παράδειγμα, είναι σημαντικό να γνωρίζει κανείς εάν παράγεται ένα «πρώτο ξέπλυμα» (όρος που χρησιμοποιείται συνήθως για να υποδηλώσει μια δυσανάλογα υψηλή απόδοση είτε της συγκέντρωσης είτε της μάζας ενός συστατικού κατά το πρώτο μέρος μιας εκδήλωσης βροχοπτώσεων ή απορροής) (Sansalone & Cristina, 2004).

Η ανάπτυξη μαθηματικών μοντέλων για τον χαρακτηρισμό της αστικής απορροής είναι ένα σημαντικό έργο, καθώς αποτελούν ένα χρήσιμο εργαλείο για το σχεδιασμό και τη διαχείριση των αστικών συστημάτων αποχέτευσης. Αυτά τα μοντέλα μπορούν να ταξινομηθούν ως:

- μοντέλα όμβριων υδάτων «βασισμένα σε διαδικασίες» ή
- μοντέλα παλινδρόμησης

Τα κλασικά μοντέλα συσσώρευσης και έκπλυσης ρύπων ανήκουν στην πρώτη ομάδα. Θεωρούν τις προηγούμενες ημέρες ξηρασίας (ADD) και τον όγκο απορροής συμβάντων (V_r) ως τις δύο κύριες επεξηγηματικές μεταβλητές, αντίστοιχα (Wang et al., 2011). Η συσσώρευση ρύπων σε μια επιφάνεια λεκάνης απορροής, ή η διαδικασία συσσώρευσης, συνήθως υπολογίζεται ως γραμμική, εκθετική, ισχύς ή συνάρτηση Michaelis-Menten του αριθμού των ADD από το προηγούμενο συμβάν καταιγίδας (Vaze & Chiew, 2002). Η μοντελοποίηση της διαδικασίας συσσώρευσης ρύπων αποτελεί μία πολύπλοκη διαδικασία,

καθώς εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως η αναλογία του επιφανειακού ρυπογόνου φορτίου που αφαιρέθηκε στο προηγούμενο συμβάν και ο καθαρισμός ή η συντήρηση της επιφάνειας (Zhao et. al., 2016). Η διαδικασία έκπλυσης μοντελοποιείται συνήθως ως εκθετική συνάρτηση του V_r (Chen, & Adams, 2006) ή του γινόμενου της διάρκειας βροχόπτωσης (D) με την ένταση αυτής (I), αφού η ένταση της βροχόπτωσης καθορίζει τη διαβρωτική ικανότητα του γεγονότος.

Τα μοντέλα παλινδρόμησης χρησιμοποιούνται γενικά με λογαριθμικά μετασχηματισμένα δεδομένα και έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως για την πρόβλεψη των συγκεντρώσεων ρύπων της αστικής απορροής και των φορτίων απορροής σε διαφορετικές χρονικές κλίμακες (ενδοσυμβάντος, συμβάντος, εποχιακής ή ετήσιας). Ένα σημαντικό πλεονέκτημα αυτών των μοντέλων είναι η απλότητα και η ευκολία βαθμονόμησής τους μετά την καθιέρωση των επεξηγηματικών μεταβλητών. Επιπλέον, τα μοντέλα αυτά μπορούν να βοηθήσουν στον εντοπισμό ενδιαφερουσών συμπεριφορών, όπως για παράδειγμα το εάν οι ρύποι βρίσκονται κατά κύριο λόγο στη φάση των σωματιδίων, ανάλογα με την ένταση και τη διάρκεια της βροχόπτωσης. ή στη διαλυμένη φάση που εξαρτάται από το υψηλότερο βάθος βροχόπτωσης. Ωστόσο, η εφαρμογή τους εκτός βαθμονομημένων συνθηκών έχει μεγαλύτερη αβεβαιότητα, καθώς αυτά τα μοντέλα γενικά δεν χρησιμοποιούν φυσικές μεταβλητές.

Παραδοσιακά, ο σχεδιασμός της υποδομής διαχείρισης όμβριων υδάτων βασίζεται σε κριτήρια ογκομετρικής δέσμευσης. Σε αυτό το πλαίσιο, υπάρχει μια αυξανόμενη συνειδητοποίηση και συμφωνία σχετικά με την καταλληλότητα της εφαρμογής μιας προσέγγισης ελέγχου μάζας ή συγκέντρωσης. Μια έννοια που προέρχεται από αυτές τις προσεγγίσεις οι οποίες βασίζονται στην ποιότητα του νερού είναι ο όγκος ποιότητας νερού (water quality volume-WQV), ο οποίος αντιπροσωπεύει τον όγκο της απορροής που αποτελεί την πρώτη έκπλυση (Sansalone & Cristina, 2004). Όπως ορίστηκε προηγουμένως, η πρώτη έκπλυση λαμβάνει χώρα όταν παράγεται μια δυσανάλογα υψηλή κινητοποίηση είτε της συγκέντρωσης είτε της μάζας του ρύπου κατά το αρχικό μέρος μιας βροχόπτωσης. Η πρώτη έκπλυση μπορεί να αναγνωριστεί μέσω των καμπυλών κινητοποίησης μάζας, η οποία αντιπροσωπεύει τη σχέση μεταξύ του κανονικοποιημένου αθροιστικού όγκου απορροής και

της κανονικοποιημένης σωρευτικής κινητοποιημένης μάζας. Οι καμπύλες κινητοποίησης ταιριάζουν με αυτές του μοντέλου νόμου ισχύος (Griffin et al., 1980) $m_r = v_r^\beta$, όπου m_r είναι η αθροιστική κανονικοποιημένη μάζα, v_r είναι ο αθροιστικός κανονικοποιημένος όγκος απορροής και β είναι ο εκθέτης μοντέλου.

Εάν η καμπύλη βρίσκεται πάνω από τη γραμμή με κλίση 1:1, ή αντίστοιχα εάν $\beta < 1$, οι μεταβλητές που σχετίζονται με την καμπύλη θεωρείται ότι αντιπροσωπεύουν ένα συμβάν πρώτης έκπλυσης. Σε αυτή τη μελέτη, η καμπύλη που προκύπτει αντιπροσωπεύει μια μέση καμπύλη για όλα τα παρακολουθούμενα συμβάντα. Οι τιμές της β προσαρμογής σε αυτό το μοντέλο για όλους τους ρύπους που μελετήθηκαν δείχνουν ότι όλοι οι ρύποι παρουσιάζουν συμπεριφορά σύμφωνα με το φαινόμενο της πρώτης έκπλυσης.

Αυτά τα μοντέλα, μαζί με αυτά που αναπτύχθηκαν στην προηγούμενη ενότητα, επιτρέπουν την πρόταση κριτηρίων που βασίζονται στη μάζα για το σχεδιασμό συσκευών αποστράγγισης σε κλίμακα ελέγχου πηγής, όπως το SuDS. Σε αυτές τις γραμμές, παρατηρήθηκε ποιοτικά ότι το TSS που υπήρχε στα δείγματα παρουσίαζε ιδιότητες ταχείας καθίζησης. Από την άλλη πλευρά, όλοι οι ρύποι συσχετίστηκαν σημαντικά με το TSS (το r_{Pearson} κυμαίνεται μεταξύ 0,41 και 0,99), που σημαίνει ότι το κλάσμα σωματιδίων είναι σημαντικό και μπορεί να θεωρηθεί ότι η αποτελεσματική απομάκρυνση του TSS αντιπροσωπεύει επίσης αποτελεσματική απομάκρυνση των ρύπων. Όλα αυτά τα ευρήματα καθιστούν δυνατή την πρόταση του TSS ως μεταβλητής ελέγχου για την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας απομάκρυνσης ρύπων της υποδομής ομβρίων υδάτων. Λαμβάνοντας υπόψη αυτά τα αποτελέσματα, μεταξύ των διαφορετικών τύπων σχεδίων SuDS, συμπεραίνεται ότι αυτά τελικώς που διατηρούν την απορροή για λίγες ώρες φαίνεται να είναι κατάλληλα για τη διαχείριση αυτών των συμβάντων τύπου πρώτης έκπλυσης, για παράδειγμα, πράσινες λωρίδες, κήποι βροχής, περιοχές βιοκατακράτησης, DB ή υγρότοποι (Terzakis et al., 2008·).

Μια άλλη προσέγγιση σχεδιασμού μπορεί να περιλαμβάνει τη θέσπιση απαίτησης απόρριψης με βάση τη συγκέντρωση. Σε αυτή την περίπτωση, το πρώτο ερώτημα που πρέπει

να απαντηθεί είναι ο στόχος ποιότητας του νερού στην υπερχειλίση SuDS. Συνήθως, οι διαχειριστές της λεκάνης είναι υπεύθυνοι για αυτή τη διαδικασία. Εν τω μεταξύ, το TSS μπορεί να θεωρηθεί ως ο σχετικός ρύπος και να οριστούν δύο συγκεντρώσεις αναφοράς (35 mg/l και 60 mg/l), οι οποίες είναι οι στόχοι για τους μεγάλους και μικρούς αστικούς οικισμούς αντίστοιχα, που απορρίπτονται στο γλυκό νερό (σύμφωνα με την Οδηγία 91/271/EEC που αφορά επεξεργασία αστικών λυμάτων).

Ωστόσο, η εκατοστιαία μάζα που αφαιρέθηκε σε αυτό το σημείο προσεγγίζει στη μέση τιμή 88,3%. Συνεπώς, προτείνεται ως κριτήριο σχεδιασμού το ότι μόνο το 20% των συμβάντων μπορεί να εκτρέψει νερό με περιεκτικότητα σε TSS > 35 mg/l. Στη συνέχεια, αξιολογείται η απόκριση πολλών όγκων DB: από το 100% του μέσου όρου V_T έως 40%. Για παράδειγμα, σε αυτήν την περίπτωση, η επιλογή ενός κήπου βροχής, μιας περιοχής βιοκατακράτησης ή ενός όγκου DB 10 l/m² στραγγιζόμενης αδιαπέραστης περιοχής, βάθους 0,2 m, θα ήταν απαραίτητη μια περιοχή 4 m², η οποία ταιριάζει πλήρως είτε σε στο κέντρο του κυκλικού κόμβου ή στην περίμετρό του.

5.5.Κριτήρια Υδραυλικού Σχεδιασμού

Για να διασφαλισθεί ότι οι διαπερατές επιφάνειες έχουν επαρκή διείσδυση και χωρητικότητα αποθήκευσης, τα κύρια σημεία που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη είναι τα ακόλουθα:

- Ο ρυθμός διείσδυσης μέσω της επιφάνειας, ο οποίος θα πρέπει να υπερβαίνει την προβλεπόμενη κατά το σχεδιασμό μέγιστη ένταση βροχόπτωσης ώστε να αποφεύγεται η επιφανειακή συσσώρευση ομβρίων υδάτων.
- Η θέση και ο σχεδιασμός των γεωφασμάτων ώστε να μεγιστοποιείται η διήθηση και να ελαχιστοποιείται ο κίνδυνος απόφραξης.
- Ο όγκος της βροχόπτωσης και η απαιτούμενη χωρητικότητα αποθήκευσης των στρωμάτων αδρανών κάτω από το χώρο στάθμευσης αυτοκινήτων. Αυτό περιλαμβάνει την εκτίμηση εκροών μέσω σωλήνων ή διείσδυσης στα

υποκείμενα εδάφη, τις προδιαγραφές των αδρανών καθώς επίσης πρόβλεψη των επιπτώσεων παγώματος.

- Ο χρόνος εκκένωσης, έτσι ώστε να ελαχιστοποιείται ο χρόνος έκθεσης του υποστρώματος σε κυκλοφοριακά φορτία όταν είναι κορεσμένος, στην περίπτωση που δεν χρησιμοποιείται αδιαπέραστη γεωμεμβράνη.
- Οι περιβαλλοντικές ρυθμιστικές αρχές, στην αρμοδιότητα των οποίων είναι η διαχείριση του κινδύνου πλημμύρας σε μια λεκάνη απορροής και η αξιολόγηση του κινδύνου για τον προσδιορισμό του κατάλληλου προτύπου εξασθένησης για κάθε τοποθεσία.
- Το υδρογράφημα, το οποίο απλοποιείται σε μια σταθερή κατανομή της έντασης στη δεδομένη διάρκεια και όλες οι βροχοπτώσεις θεωρείται ότι περνούν αμέσως στο διαπερατό σύστημα οδοστρώματος χωρίς να σημειωθεί εξασθένηση. Αυτή είναι μια συντηρητική θεώρηση και θα πρέπει να παρέχει έναν ενσωματωμένο παράγοντα ασφάλειας στα σχέδια.

Ένα σημαντικό ζήτημα με τις διαπερατές επιφάνειες είναι ότι το έδαφος, η άμμος και άλλα υλικά του εργοταξίου ρυπαίνουν τη διαπερατή επιφάνεια κατά την κατασκευή, μειώνοντας έτσι την ιδιότητα της ελεύθερης αποστράγγισης. Το μεγαλύτερο μέρος της απόφραξης των διαπερατών επιφανειών (ιδιαίτερα της πορώδους ασφάλτου) συμβαίνει κατά την κατασκευή. Αυτό μπορεί να ξεπεραστεί με την εκπαίδευση των εργολάβων και των εργαζομένων και εξηγώντας πώς λειτουργεί η διαπερατή επιφάνεια και τη σημασία της διατήρησης της καθαρότητας της από πρόσθετα υλικά. Θα πρέπει να λαμβάνεται μέριμνα ώστε η κατασκευαστική κίνηση να μη μεταφέρει λάσπη και χώμα στην διαπερατή επιφάνεια, επίσης σε όλα τα έργα θα πρέπει να προϋπολογίζεται η κατάλληλη επίβλεψη και επιθεώρηση της εγκατάστασης.

Μετά τη διακοπή των κύριων κατασκευαστικών εργασιών, θα πρέπει να σχεδιαστεί προσεκτικά η προετοιμασία, η διαχείριση και οργάνωση της διαμόρφωσης του χώρου, ώστε να αποτραπεί η απρόσεκτη εναπόθεση εδάφους, χλοοτάπητα και άλλων υλικών που

εμποδίζουν τη διαπερατή επιφάνεια. Η απορροή από διαμορφωμένες περιοχές, η οποία είναι πηγή εδάφους και άλλων υλικών, θα πρέπει να αποτρέπεται να ρέει στην διαπερατή επιφάνεια και να προκαλεί φράξιμο.

6. Συμπεράσματα

Στο ευρύτερο πλαίσιο της διαχείρισης των πλημμυρών στο οδόστρωμα εντάσσονται τα προληπτικά μέτρα που αποτρέπουν την εμφάνισή των πλημμυρικών φαινομένων και στοχεύουν στην αποτελεσματική διαχείριση των συνεπειών τους. Τα αντιπλημμυρικά έργα προϋποθέτουν την κατάρτιση ειδικών σχετικών μελετών που θα οδηγήσουν στην κατασκευή αρχικά έργων που να εμποδίζουν τη διάβρωση των εδαφών σε πληγείσες περιοχές, προστατευτικών έργων που αφορούν μια σειρά αντικειμένων, συμπεριλαμβανομένης της πρόβλεψης του καθαρισμού της κοίτης των υδατορευμάτων από εμπόδια που παρεμποδίζουν την απορροή των υδάτων, αλλά και την άρση προσχώσεων.

Οι συγκεκριμένοι αρμόδιοι φορείς θα πρέπει να τελούν σε ετοιμότητα αναφορικά για τα ζητήματα που σχετίζονται με τον έλεγχο λειτουργίας και τις εργασίες συντήρησης των έργων αντιπλημμυρικής προστασίας, την ενημέρωση και την αξιολόγηση της επικινδυνότητας των επικείμενων πλημμυρικών φαινομένων και τον προγραμματισμό και, συνακόλουθα, την εκτέλεση των έργων εκείνων που θεωρείται πως συμβάλλουν στη διαμόρφωση ενός ολοκληρωμένου σχεδίου προστασίας από την πλημμύρα. Οι φορείς της λειτουργίας και της συντήρησης του οδικού δικτύου είναι επιφορτισμένοι με την εξασφάλιση της εύρυθμης λειτουργίας των αντιπλημμυρικών έργων και συστημάτων, διαδικασίες που θα πρέπει να πραγματοποιούνται και να ολοκληρώνονται κατά τη διάρκεια περιόδων που δεν θεωρείται αυξημένος ο κίνδυνος εκδήλωσης πλημμυρικών φαινομένων.

Τα συστήματα αιεφόρου αποστράγγισης (Sustainable drainage systems, SuDS) θα πρέπει να σχεδιάζονται ώστε να δίνουν λύση σε κάθε διαφορετική περίπτωση, καθώς δεν υπάρχει μια μοναδική λύση που να ταιριάζει παντού. Συχνά τα καλύτερα σχήματα και συστατικά των SuDS είναι εκείνα που έχουν συμπεριλάβει μια σειρά από τεχνογνωσία αλλά και την κοινότητα στο σχεδιασμό τους. Οι σχεδιαστές διαδραματίζουν ζωτικό ρόλο στη συμμετοχή των κατάλληλων ειδικών την κατάλληλη στιγμή, διασφαλίζοντας ότι το SuDS ενσωματώνεται αποτελεσματικά στην ευρύτερη ανάπτυξη.

Ο σχεδιασμός είναι σημαντικός παράγοντας σε όλα τα επίπεδα της διαδικασίας ανάπτυξης με διαφορετικές πληροφορίες και λεπτομέρειες που απαιτούνται σε διαφορετικά στάδια σχεδιασμού. Με τον δημιουργικό και καινοτόμο σχεδιασμό είναι δυνατή η βιώσιμη αποστράγγιση σε οποιαδήποτε περιοχή.

Για να αξιοποιηθούν πλήρως οι ευκαιρίες μιας τοποθεσίας και να ξεπεραστούν οι πιθανές προκλήσεις, η βιώσιμη αποστράγγιση θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη από την έναρξη του έργου. Οι σχεδιαστές θα πρέπει να κατανοήσουν τις ακόλουθες πτυχές και να τις συμπεριλάβουν κατά τον σχεδιασμό SuDS:

- ✓ Καθορισμός των φιλοδοξιών και των στόχων για το είδος, την ποσότητα και την ποιότητα της ανάπτυξης
- ✓ Καθορισμός των επιδιώξεων της τοπικής αρχής σχεδιασμού για την τοποθεσία, αν υπάρχουν απαιτήσεις πολιτικής ή τοπική καθοδήγηση
- ✓ Βελτίωση του σχεδιασμού ανάπτυξης ώστε να αποτελέσει μέρος της αντιμετώπισης του νερού με βιώσιμο τρόπο
- ✓ Βελτίωση της ανάπτυξης μέσω του SuDS και μεριμνα κατά τον σχεδιασμό του τοπίου και των εξωτερικών περιοχών για την ενσωμάτωση του νερού με βιώσιμο τρόπο, όπως για παράδειγμα με τη δημιουργία δημόσιου ανοιχτού χώρου που χρησιμοποιείται ως λεκάνη κράτησης
- ✓ Ενίσχυση της βιοποικιλότητας μέσω του SuDS
- ✓ Πιθανολόγηση του κατάλληλου συνδυασμού αδιαπέραστων και διαπερατών επιφανειών
- ✓ Καθορισμός της ρύπανσης της απορροής από τη χρήση γης στην τοποθεσία και αντιμετώπιση των απαιτήσεων επεξεργασίας για το SuDS
- ✓ Εξασφάλιση της μακροχρόνιας συντήρησης και διαχείρισης του SuDS.
- ✓ Ενσωμάτωση των διαδρομών χερσαίας ροής και της υπέρβασης αποχέτευσης στο γενικό σχέδιο

Οι απαντήσεις στα παραπάνω ζητήματα συνήθως απαιτούν τη συμβολή επιστημόνων διαφορετικών ειδικοτήτων, συμπεριλαμβανομένων μηχανικών, αστικών σχεδιαστών, αρχιτεκτόνων, αρχιτεκτόνων τοπίου και περιβαλλοντολόγων. Με βάση την ανάλυση που παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο αναγνωρίστηκαν τα ακόλουθα συστήματα SuDS που μπορούν να εφαρμοσθούν για να διαχειριστούν τις όμβριες απορροές από οδικά δίκτυα:

- Οι τάφροι απορροής (swales)
- Οι λεκάνες κράτησης (detention basins)
- Υγροτόποι (wetlands)
- Οι λεκάνες κράτησης για αποστράγγιση δρόμου
- Τα σύστημα βιοπροστασίας
- Οι υδροδυναμικοί διαχωριστές δίνης (vortex separators)
- Η δεξαμενή εξασθένησης (attenuation tank ή attenuation storage)

Έχει αποδειχθεί ότι ένα έργο SuDS προσφέρει πολλαπλά οφέλη στην περιοχή, για το λόγο αυτό στα σχέδια ανάπτυξης μιας τοποθεσίας θα πρέπει να ενοποιούνται και αυτά τα έργα. Τα περισσότερα SuDS παρά τη σημαντική τους συνεισφορά στο μετριασμό των αστικών πλημμυρών και της διάχυτης ρύπανσης, έχουν περιορισμούς στην απόδοσή τους κυρίως ως προς την αντιπλημμυρική προστασία στις περιπτώσεις πολύ ισχυρών βροχοπτώσεων.

Η συμπερίληψη του SuDS στο στάδιο του κύριου σχεδιασμού ή στο στάδιο του σχεδιασμού ανάπτυξης της τοποθεσίας έχει σημαντική επίδραση στη βιωσιμότητα και τη σχέση κόστους-αποτελεσματικότητας. Ο κύριος σχεδιασμός παρέχει μια στρατηγική προσέγγιση για την εξέταση των ενίοτε ανταγωνιστικών απαιτήσεων για ανάπτυξη. Είναι μια προσέγγιση αστικού σχεδιασμού χωρίς αποκλεισμούς που φέρνει κοντά τους ενδιαφερόμενους, για την αναγέννηση ή την ανάπτυξη περιοχών που δημιουργούν χώρους υψηλής ποιότητας.

Η ενσωμάτωση του SuDS στον χωροταξικό σχεδιασμό είναι μια σημαντική πτυχή που πρέπει να συμπεριληφθεί στις απαιτήσεις του σχεδιασμού ανάπτυξης της περιοχής. Κατά

την αναθεώρηση ενός γενικού σχεδίου στο στάδιο του σχεδιασμού, ο σχεδιαστής πρέπει να διασφαλίσει ότι η χωρική διάταξη ελαχιστοποιεί την απορροή και ενσωματώνει στοιχεία SuDS.

Τα κριτήρια σχεδιασμού ενός έργου SuDS σχετίζονται με την ποσότητα νερού που θα διαχειρισθεί, την ποιότητα του νερού καθώς και τις ανέσεις και βιοποικιλότητα. Η ποσότητα νερού σχετίζεται με τα υδραυλικά έργα, τις πλημμύρες και τις απορροές και οι βασικές αρχές που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη είναι ο ρυθμός ροής και ο όγκος της απορροής που θα πρέπει να διαχειρίζονται σε συμφωνημένα επίπεδα και να λαμβάνεται υπόψη η υπέρβαση της αποστράγγισης. Οι στόχοι που πρέπει να επιτευχθούν είναι η προστασία ανθρώπων και περιουσιών από όλες τις πηγές πλημμύρας, συμπεριλαμβανομένων των τοπικών υδάτινων ρευμάτων, του συστήματος αποχέτευσης και των χειραίων ροών. Επίσης η ανάπτυξη του έργου δεν πρέπει να επιδεινώνει τον κίνδυνο πλημμύρας στην ευρύτερη λεκάνη απορροής.

Η ποιότητα νερού σχετίζεται με τον έλεγχο της ρύπανσης και τη διαχείριση και οι βασικές αρχές του σχεδιασμού είναι ο μετριασμός των πιθανών κινδύνων ρύπανσης καθώς και η παροχή επαρκούς χρόνου κατακράτησης για την επεξεργασία των ρύπων. Ο κίνδυνος ρύπανσης μπορεί να μετριαστεί με τη χρήση του ελέγχου της πηγής, του συστήματος διαχείρισης SuDS με τον κατάλληλο αριθμό σταδίων επεξεργασίας.

Σε ότι αφορά το κριτήριο των ανέσεων και της βιοποικιλότητας, το SuDS μπορεί να επηρεάσει θετικά τον αστικό σχεδιασμό και την αξία του τοπίου μέσω της παροχής χώρων πρασίνου, της βλάστησης που ενσωματώνει το νερό στο δομημένο περιβάλλον, παρέχοντας με τον τρόπο αυτό ευκαιρίες για βιοποικιλότητα. Αυτό είναι απαραίτητο εάν πρόκειται να συμπεριληφθεί η βιώσιμη αποχέτευση σε δημόσιους ανοιχτούς χώρους και να συμβάλει στην πράσινη υποδομή. Επίσης πρέπει να αντιμετωπιστούν οι ανησυχίες για την υγεία και την ασφάλεια. Τα στοιχεία του SuDS θα πρέπει να έχουν ρηχές πλαϊνές πλαγιές και οι λίμνες πρέπει να έχουν ρηχές άκρες και να κάνουν καλή χρήση της βλάστησης για να αποτρέψουν την πρόσβαση.

Συμπερασματικά τα έργα SuDS, παρέχουν ένα χρήσιμο πλαίσιο για την παράδοση ενός σχεδίου που πληροί στόχους που έχουν συμφωνηθεί μεταξύ της κοινότητας και της ομάδας σχεδιασμού. Αυτά θα σχετίζονται ιδανικά με τη διαχείριση του κινδύνου πλημμύρας (ποσότητα νερού), την ποιότητα του νερού και την παροχή βιοποικιλότητας και ανέσεων. Μπορεί να μην είναι δυνατό να μεγιστοποιηθούν οι ευκαιρίες και για τους τρεις στόχους και ο βαθμός στον οποίο συμβαίνει αυτό θα πρέπει να συζητηθεί με τους σχετικούς ενδιαφερόμενους φορείς.

Βιβλιογραφία

- Barrett, M. E., Irish Jr, L. B., Malina Jr, J. F., & Charbeneau, R. J. (1998). Characterization of highway runoff in Austin, Texas, area. *Journal of Environmental Engineering*, 124(2), 131-137.
- Bertrand-Krajewski, J. L., Chebbo, G., & Saget, A. (1998). Distribution of pollutant mass vs volume in stormwater discharges and the first flush phenomenon. *Water research*, 32(8), 2341-2356.
- Borrelli, P., Robinson, D. A., Fleischer, L. R., Lugato, E., Ballabio, C., Alewell, C., ... & Panagos, P. (2017). An assessment of the global impact of 21st century land use change on soil erosion. *Nature communications*, 8(1), 1-13.
- Brodie, I. M., & Dunn, P. K. (2010). Commonality of rainfall variables influencing suspended solids concentrations in storm runoff from three different urban impervious surfaces. *Journal of Hydrology*, 387(3-4), 202-211.
- Cai, Q., Chen, Z., Chen, X., Chen, X., & Zhang, D. (2017). Simulation of control efficiency of low impact development measures for urban stormwater. *Water Resources Protection*, 33(2), 31-36.
- Castro-Fresno, D., Andrés-Valeri, V. C., Sañudo-Fontaneda, L. A., & Rodriguez-Hernandez, J. (2013). Sustainable drainage practices in Spain, specially focused on pervious pavements. *Water*, 5(1), 67-93.
- Chahar, B. R., Graillet, D., & Gaur, S. (2012). Storm-water management through infiltration trenches. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 138(3), 274-281.
- Chairuddin, F. (2013). Experimental Assessment of the Impact of Rainwater Inundation on Asphalt Pavement Structures (Case Study Dr. Wahidin Sudiro Husodo Street, Makassar City). *Proceedings of KonTeks*, 7.
- Chen, J., & Adams, B. J. (2006). Analytical urban storm water quality models based on pollutant buildup and washoff processes. *Journal of Environmental Engineering*, 132(10), 1314-1330.
- Choi, J. Y., Jeong, H., Choi, K. Y., Hong, G. H., Yang, D. B., Kim, K., & Ra, K. (2020). Source identification and implications of heavy metals in urban roads for the coastal pollution in a beach town, Busan, Korea. *Marine Pollution Bulletin*, 161, 111724.

- Crow, W. T., Chen, F., Reichle, R. H., & Xia, Y. (2019). Diagnosing bias in modeled soil moisture/runoff coefficient correlation using the SMAP level 4 soil moisture product. *Water Resources Research*, 55(8), 7010-7026.
- Czemieliński, J. (2014). Storm water quality of first flush urban runoff in relation to different traffic characteristics. *Urban Water Journal*, 11(4), 284-296.
- Davis, A. P. (2008). Field performance of bioretention: Hydrology impacts. *Journal of hydrologic engineering*, 13(2), 90-95.
- Di Modugno, M., Gioia, A., Gorgoglione, A., Iacobellis, V., La Forgia, G., Piccinni, A. F., & Ranieri, E. (2015). Build-up/wash-off monitoring and assessment for sustainable management of first flush in an urban area. *Sustainability*, 7(5), 5050-5070.
- Drake, J., & Bradford, A. (2013). Assessing the potential for restoration of surface permeability for permeable pavements through maintenance. *Water Science and Technology*, 68(9), 1950-1958.
- Dreelin, E. A., Fowler, L., & Carroll, C. R. (2006). A test of porous pavement effectiveness on clay soils during natural storm events. *Water research*, 40(4), 799-805.
- Driscoll, E. D., Shelley, P. E., & Strecker, E. W. (1990). *Pollutant loadings and impacts from highway stormwater runoff. Volume III: Analytical investigation and research report* (No. FHWA-RD-88-008).
- Fallah Shorshani, M., Bonhomme, C., Petrucci, G., André, M., & Seigneur, C. (2014). Road traffic impact on urban water quality: a step towards integrated traffic, air and stormwater modelling. *Environmental Science and Pollution Research*, 21(8), 5297-5310.
- Geiger, W. (1987). Flushing effects in combined sewer systems. In *Proceedings of the 4th International Conference Urban Drainage, Lausanne, Switzerland, 1987* (pp. 40-46).
- Ghavanloughajar, M., Borthakur, A., Valenca, R., McAdam, M., Khor, C. M., Dittrich, T. M., ... & Mohanty, S. K. (2021). Iron amendments minimize the first-flush release of pathogens from stormwater biofilters. *Environmental Pollution*, 281, 116989.
- Golio, M. (2000). *The RF and microwave handbook*. CRC press.

- Griffin Jr, D. M., Grizzard, T. J., Randall, C. W., Helsel, D. R., & Hartigan, J. P. (1980). Analysis of non-point pollution export from small catchments. *Journal (Water Pollution Control Federation)*, 780-790.
- Guan, M., Sillanpää, N., & Koivusalo, H. (2015). Assessment of LID practices for restoring pre-development runoff regime in an urbanized catchment in southern Finland. *Water Science and Technology*, 71(10), 1485-1491.
- Gülbaz, S., & Kazezyılmaz-Alhan, C. M. (2017). An evaluation of hydrologic modeling performance of EPA SWMM for bioretention. *Water science and technology*, 76(11), 3035-3043.
- Guo, X., Zhang, J., Zhou, B., Liu, W., Pei, J., & Guan, Y. (2019). Sponge roads: the permeable asphalt pavement structures based on rainfall characteristics in central plains urban agglomeration of China. *Water Science and Technology*, 80(9), 1740-1750.
- Hammad, H. M., Ashraf, M., Abbas, F., Bakhat, H. F., Qaisrani, S. A., Mubeen, M., ... & Awais, M. (2019). Environmental factors affecting the frequency of road traffic accidents: a case study of sub-urban area of Pakistan. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(12), 11674-11685.
- Huang, T., Wang, Y., & Zhang, J. (2017, July). Simulation and evaluation of low impact development of urban residential district based on SWMM and GIS. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 74, No. 1, p. 012009). IOP Publishing.
- Huang, Z., Yang, H., & Yang, D. (2016). Dominant climatic factors driving annual runoff changes at the catchment scale across China. *Hydrology and Earth System Sciences*, 20(7), 2573-2587.
- Huidrom, L., Das, L. K., & Sud, S. K. (2013). Method for automated assessment of potholes, cracks and patches from road surface video clips. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 104, 312-321.
- Jabro, J. D., Iversen, W. M., Stevens, W. B., Evans, R. G., Mikha, M. M., & Allen, B. L. (2016). Physical and hydraulic properties of a sandy loam soil under zero, shallow and deep tillage practices. *Soil and Tillage Research*, 159, 67-72.
- Jhorar, R. K., Van Dam, J. C., Bastiaanssen, W. G. M., & Feddes, R. A. (2004). Calibration of effective soil hydraulic parameters of heterogeneous soil profiles. *Journal of Hydrology*, 285(1-4), 233-247.

- Jin, C., Zhao, S., Yan, X., & Zhou, Y. (2010). Impacts of permeable brick and sunken lawn on urban stormwater. *China Water Wastewater*, *1*, 40-46.
- Jose, R., Wade, R., & Jefferies, C. (2015). Smart SUDS: Recognising the multiple-benefit potential of sustainable surface water management systems. *Water science and technology*, *71*(2), 245-251.
- Kim, J., Lee, J., Song, Y., Han, H., & Joo, J. (2018). Modeling the runoff reduction effect of low impact development installations in an industrial area, South Korea. *Water*, *10*(8), 967.
- Kramer, M. G. (2013). Our built and natural environments: a technical review of the interactions among land use, transportation, and environmental quality.
- Kuang, X., Sansalone, J., Ying, G., & Ranieri, V. (2011). Pore-structure models of hydraulic conductivity for permeable pavement. *Journal of Hydrology*, *399*(3-4), 148-157.
- Lau, S. L., Ma, J. S., Kayhanian, M., & Stenstrom, M. K. (2002). First flush of organics in highway runoff. In *Global Solutions for Urban Drainage* (pp. 1-12).
- Lee, H., Lau, S. L., Kayhanian, M., & Stenstrom, M. K. (2004). Seasonal first flush phenomenon of urban stormwater discharges. *Water research*, *38*(19), 4153-4163.
- Lin, Y., & Wei, X. (2008). The impact of large-scale forest harvesting on hydrology in the Willow watershed of Central British Columbia. *Journal of Hydrology*, *359*(1-2), 141-149.
- Liu, A., Goonetilleke, A., & Egodawatta, P. (2012). Taxonomy for rainfall events based on pollutant wash-off potential in urban areas. *Ecological Engineering*, *47*, 110-114.
- Liu, A., Liu, L., Li, D., & Guan, Y. (2015). Characterizing heavy metal build-up on urban road surfaces: Implication for stormwater reuse. *Science of the Total Environment*, *515*, 20-29.
- Liu, Y., Zheng, Y., Liang, Y., Liu, S., & Rosenblum, D. S. (2016, June). Urban water quality prediction based on multi-task multi-view learning. In *Proceedings of the 25th international joint conference on artificial intelligence*.
- McGrane, S. J. (2016). Impacts of urbanisation on hydrological and water quality dynamics, and urban water management: a review. *Hydrological Sciences Journal*, *61*(13), 2295-2311.

- Merz, R., & Blöschl, G. (2009). A regional analysis of event runoff coefficients with respect to climate and catchment characteristics in Austria. *Water Resources Research*, 45(1).
- Mubarak, I., Angulo-Jaramillo, R., Mailhol, J. C., Ruelle, P., Khaledian, M., & Vauclin, M. (2010). Spatial analysis of soil surface hydraulic properties: Is infiltration method dependent?. *Agricultural water management*, 97(10), 1517-1526.
- Paik, D. H., Lim, Y. H., Choi, J. K., Jung, P. G., & Kwak, D. H. (2005). Study on the Runoff Characteristics of Non-point Source Pollution in Municipal Area Using SWMM Model-A Case Study in Jeonju City. *Journal of Environmental Science International*, 14(12), 1185-1194.
- Perales-Momparler, S., Andrés-Doménech, I., Hernández-Crespo, C., Vallés-Morán, F., Martín, M., Escuder-Bueno, I., & Andreu, J. (2017). The role of monitoring sustainable drainage systems for promoting transition towards regenerative urban built environments: a case study in the Valencian region, Spain. *Journal of Cleaner Production*, 163, S113-S124.
- Polkowska, Z., Gryniewicz, M., Zabiegaia, B., & Namiesnik, J. (2001). Levels of pollutants in runoff water from roads with high traffic intensity in the city of Gdansk, Poland. *Polish Journal of Environmental Studies*, 10(5), 351-364.
- Reynolds, W. D. (2002). Saturated and field-unsaturated water flow parameters: laboratory methods. *Physical Methods*, 802-817.
- Rezaei, M., Seuntjens, P., Joris, I., Boëne, W., Van Hoey, S., Campling, P., & Cornelis, W. M. (2016). Sensitivity of water stress in a two-layered sandy grassland soil to variations in groundwater depth and soil hydraulic parameters. *Hydrology and Earth System Sciences*, 20(1), 487-503.
- Rienzner, M., & Gandolfi, C. (2014). Investigation of spatial and temporal variability of saturated soil hydraulic conductivity at the field-scale. *Soil and Tillage Research*, 135, 28-40.
- Sansalone, J. J., & Buchberger, S. G. (1997). Characterization of solid and metal element distributions in urban highway stormwater. *Water science and technology*, 36(8-9), 155-160.

- Sansalone, J. J., & Cristina, C. M. (2004). First flush concepts for suspended and dissolved solids in small impervious watersheds. *Journal of environmental engineering*, 130(11), 1301-1314.
- Shi, Z. H., Ai, L., Li, X., Huang, X. D., Wu, G. L., & Liao, W. (2013). Partial least-squares regression for linking land-cover patterns to soil erosion and sediment yield in watersheds. *Journal of Hydrology*, 498, 165-176.
- Shorshani, M. F., André, M., Bonhomme, C., & Seigneur, C. (2015). Modelling chain for the effect of road traffic on air and water quality: Techniques, current status and future prospects. *Environmental Modelling & Software*, 64, 102-123.
- Sriwongsitanon, N., & Taesombat, W. (2011). Effects of land cover on runoff coefficient. *Journal of Hydrology*, 410(3-4), 226-238.
- Stenstrom, M. K., & Kayhanian, M. (2005). *First flush phenomenon characterization* (No. CTSW-RT-05-073.02. 6). Sacramento, CA, USA: California Department of Transportation Division of Environmental Analysis.
- Tan, F., Guo, Y., Zhang, W., Xu, X., Zhang, M., Meng, F., ... & Morawska, L. (2021). Large-Scale Spraying of Roads with Water Contributes to, Rather Than Prevents, Air Pollution. *Toxics* 2021, 9, 122.
- Tang, L., Yang, D., Hu, H., & Gao, B. (2011). Detecting the effect of land-use change on streamflow, sediment and nutrient losses by distributed hydrological simulation. *Journal of Hydrology*, 409(1-2), 172-182.
- Tarasova, L., Basso, S., Poncelet, C., & Merz, R. (2018). Exploring controls on rainfall-runoff events: 2. Regional patterns and spatial controls of event characteristics in Germany. *Water Resources Research*, 54(10), 7688-7710.
- Temprano, J., Arango, Ó., Cagiao, J., Suárez, J., & Tejero, I. (2006). Stormwater quality calibration by SWMM: A case study in Northern Spain. *Water Sa*, 32(1), 55-63.
- Terzakis, S., Fountoulakis, M. S., Georgaki, I., Albantakis, D., Sabathianakis, I., Karathanasis, A. D., ... & Manios, T. (2008). Constructed wetlands treating highway runoff in the central Mediterranean region. *Chemosphere*, 72(2), 141-149.
- Tuomela, C., Jato-Espino, D., Sillanpää, N., & Koivusalo, H. (2018, September). Modelling stormwater pollutant reduction with LID scenarios in SWMM. In *International Conference on Urban Drainage Modelling* (pp. 96-101). Springer, Cham.

- Vaze, J., & Chiew, F. H. (2002). Experimental study of pollutant accumulation on an urban road surface. *Urban Water*, 4(4), 379-389.
- Wang, L., Wei, J., Huang, Y., Wang, G., & Maqsood, I. (2011). Urban nonpoint source pollution buildup and washoff models for simulating storm runoff quality in the Los Angeles County. *Environmental Pollution*, 159(7), 1932-1940.
- Weiss, P. T., & Gulliver, J. S. (2015). Effective saturated hydraulic conductivity of an infiltration-based stormwater control measure. *Journal of Sustainable Water in the Built Environment*, 1(4), 04015005.
- Woods Ballard, B., Wilson, S., Udale-Clarke, H., Illman, S., Scott, T., Ashley, R., & Kellagher, R. (2015). The SuDS Manual; CIRIA: London, UK, 2015. *Google Scholar*.
- Woods-Ballard, B., Kellagher, R., Martin, P., Jefferies, C., Bray, R., & Shaffer, P. (2007). *The SUDS manual* (Vol. 697). London: Ciria.
- Xie, J., Wu, C., Li, H., & Chen, G. (2017). Study on storm-water management of grassed swales and permeable pavement based on SWMM. *Water*, 9(11), 840.
- Yan, J., Jia, S., Lv, A., & Zhu, W. (2019). Water resources assessment of China's transboundary river basins using a machine learning approach. *Water Resources Research*, 55(1), 632-655.
- Yang, L. I., Jun-Shi, H. E., Ke-Bao, D., & You-Jing, S. (2017). Application of low impact development in runoff reduction effect analysis based on SWMM model. *Water Resources and Power*, 35(8), 23-26.
- Yannopoulos, S., Basbas, S., Andrianos, T. H., Rizos, C. H., & Moutzouris. (2004). Receiving waters pollution investigation due to the interurban roads storm water runoff. In *Proceedings from the International Conference on Protection and Restoration of the Environment VII, Mykonos, Greece (CD)*.
- Yilmaz, E., & Koç, C. (2014). Physically and chemically evaluation for the water quality criteria in a farm on Akcay. *Journal of Water Resource and Protection*, 2014.
- Yunianta, A., & Setiadji, B. H. (2018). Sustainable road drainage system: Experimental model. In *MATEC Web of Conferences* (Vol. 181, p. 11005). EDP Sciences.

- Yunianta, A., Suripin, B. H. S., & Setiadji, B. H. (2020). Application of Sustainable Road Drainage System: Simulation by Using SWMM Program. *Civil Engineering and Architecture*, 8(2).
- Zhang, D., Zhao, D., & Chen, J. (2009). Review and application of urban storm runoff control technology. *Water Wastewater Eng*, 35, 25-29.
- Zhang, S., & Guo, Y. (2015). SWMM simulation of the storm water volume control performance of permeable pavement systems. *Journal of Hydrologic Engineering*, 20(8), 06014010.
- Zhang, Z., Chen, X., Huang, Y., & Zhang, Y. (2014). Effect of catchment properties on runoff coefficient in a karst area of southwest China. *Hydrological Processes*, 28(11), 3691-3702.
- Zhang, Z., Chen, X., Huang, Y., & Zhang, Y. (2014). Effect of catchment properties on runoff coefficient in a karst area of southwest China. *Hydrological Processes*, 28(11), 3691-3702.
- Zhao, H., Chen, X., Hao, S., Jiang, Y., Zhao, J., Zou, C., & Xie, W. (2016). Is the wash-off process of road-deposited sediment source limited or transport limited?. *Science of the Total Environment*, 563, 62-70.
- Zhao, P., Cheng, W., Pang, L., & Guo, W. (2019). Study on hydrological effect of permeable pavement system based on SWMM. *Water Resources and Power*, 37(1), 29-31.
- Zhenci, X., & Guo, Y. (2017). Simulation test of runoff on different underlying surfaces in urban area. *South North Water Transf. Water Sci. Technol*, 10, 64-66.
- Zhou, F., Peng, X., & Li, Y. (2017). Impact of sunken lawn on urban rainwater runoff. *Water Resour Hydropower Northeast China*, 10, 10-11.
- Zhu, H., Yu, M., Zhu, J., Lu, H., & Cao, R. (2019). Simulation study on effect of permeable pavement on reducing flood risk of urban runoff. *International journal of transportation science and technology*, 8(4), 373-382.
- Βαγιόκας, Ν. Δ. (2008). *Ανάπτυξη μεθοδολογίας για την εκτίμηση και διαχείρισης της επικινδυνότητας κατά την οδική μεταφορά επικίνδυνων εμπορευμάτων σύμφωνα με την αρχή της προφύλαξης της Ευρωπαϊκής Ένωσης* (No. GRI-2009-2068). Aristotle University of Thessaloniki.