

Παρασιτικές Εισροές σε Δίκτυα Ακαθάρτων: Αποτίμηση του Προβλήματος στην Ελλάδα

Ι. ΖΑΛΑΧΩΡΗ

Πολιτικός Μηχανικός ΕΜΠ

Δ. ΚΟΥΤΣΟΓΙΑΝΝΗΣ

Πολιτικός Μηχανικός,
Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΜΠ

Α. ΑΝΔΡΕΑΔΑΚΗΣ

Πολιτικός Μηχανικός,
Καθηγητής ΕΜΠ

Σύντομη Περίληψη

Οι παρασιτικές εισροές σε δίκτυα ακαθάρτων αποτελούν ένα από τα σοβαρότερα προβλήματα των αστικών δικτύων αποχέτευσης. Σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία, οι πρόσθετες εισροές συχνά ανέρχονται στο 100% της παροχής λυμάτων, προκαλώντας σοβαρά προβλήματα στο δίκτυο, την εγκατάσταση επεξεργασίας λυμάτων, το περιβάλλον και τη δημόσια υγεία. Κατάλληλο θεσμικό πλαίσιο έχει καταρτιστεί σε λίγες χώρες, ενώ σε κάποιες άλλες είναι σε εξέλιξη ερευνητικά προγράμματα. Πληθώρα μεθόδων συστήνονται διεθνώς για την ανίχνευση και τον περιορισμό των παρασιτικών εισροών.

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, πέρα από τη διεθνή βιβλιογραφική επισκόπηση, αναπτύχθηκαν πιλοτικές εφαρμογές στον ελλαδικό χώρο και συγκεκριμένα στις πόλεις των Ιωαννίνων και της Καρδίτσας. Για κάθε πόλη διερευνήθηκαν οι συνθήκες σχετικά με τις παρασιτικές εισροές και στη συνέχεια δημιουργήθηκε μοντέλο περιγραφής και ποσοτικοποίησής τους. Τέλος, ελέγχθηκαν οι επιδόσεις του μοντέλου και προσδιορίστηκαν οι συνιστώσες των ακαθάρτων για κάθε πόλη. Το γενικό συμπέρασμα είναι ότι η ποσότητα των παρασιτικών εισροών είναι αρκετά σημαντική, υπερβαίνοντας τις εκτιμήσεις που συνήθως γίνονται στις μελέτες σχεδιασμού των δικτύων.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

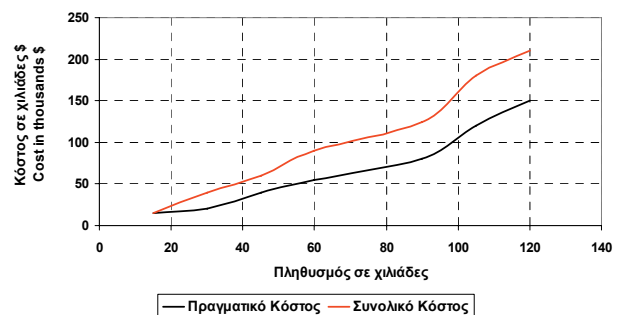
Στην παρούσα εργασία εξετάζεται το ζήτημα των παρασιτικών εισροών στα δίκτυα ακαθάρτων. Ως παρασιτικές εισροές ορίζονται τα όμβρια και τα υπόγεια ύδατα που εισέρχονται στο δίκτυο λόγω ρωγματώσεων, ατελειών και παραμορφώσεων των αγωγών και των συνδέσεών τους, ελλιπούς στεγάνωσης των φρεατίων και παράνομης σύνδεσης της απαγωγής ομβρίων από κτίρια (σκεπές, αυλές, θεμελίωση) στο δίκτυο ακαθάρτων. Οι πρόσθετες εισροές εκτιμάται ότι προσ αυξάνουν σημαντικά, συχνά και κατά 100%, την παροχή λυμάτων στις Ηνωμένες Πολιτείες [25]. Οι κυριότερες επιπτώσεις στο αποχετευτικό δίκτυο και την εγκατάσταση επεξεργασίας από την εισροή υπογείων και ομβρίων υδάτων, επιγραμματικά, είναι οι ακόλουθες:

- η υπερφόρτωση των αποχετευτικών αγωγών,
- η υπερχειλίση των αποχετευτικών αγωγών με άμεση συνέπεια την εκροή ακαθάρτων σε κτίρια ή δρόμους,

- η ανεπαρκής επεξεργασία των λυμάτων,
- η αύξηση του κόστους μεταφοράς και επεξεργασίας των λυμάτων,
- η επιβάρυνση της δημόσιας υγείας, και
- η επιβάρυνση του οικιστικού και φυσικού περιβάλλοντος.

Χαρακτηριστικό του πρόσθετου κόστους, λόγω παρασιτικών εισροών είναι το Σχήμα 1. Το γράφημα του σχήματος προέκυψε θεωρώντας ότι οι παρασιτικές εισροές ανέρχονται στο 30% της συνολικής παροχής ακαθάρτων. Παρατηρείται ότι για πληθυσμό 120000 το πρόσθετο κόστος εκτιμάται στα 50000 \$ [7, 21,22].

Πρόσθετο Κόστος λόγω Παρασιτικών Εισροών



Πηγή: Liu & Vipulanandan, 1998

Σχήμα 1: Πρόσθετο κόστος λόγω παρασιτικών εισροών

Figure 1: Additional cost due to Infiltration/ Inflow

Στις Ηνωμένες Πολιτείες το πρόβλημα των παρασιτικών εισροών μελετάται από τις αρχές της δεκαετίας του 1970, με αποτέλεσμα να έχει καταρτισθεί θεσμικό πλαίσιο για την ανίχνευση και τον περιορισμό τους. Οι ομοσπονδιακοί κανονισμοί έχουν θεσπιστεί από την Environmental Protection Agency (USEPA), αλλά υφίστανται τις κατάλληλες τροποποιήσεις ανά πολιτεία με βάση τις υπάρχουσες συνθήκες [22]. Με βάση τις διατάξεις της EPA [14, 15], μέτρα για τον περιορισμό του προβλήματος επιβάλλονται όταν η τιμή των υπογείων εισροών ξεπεράσει τα 450 L ανά κάτοικο και ημέρα (120 gpcd) και των όμβριων εισ-

ρών τα 1040 L ανά κάτοικο και ημέρα (275 gpcd). Στην Ευρώπη, από τις αρχές της δεκαετίας του 1990 έχει αρχίσει η έρευνα σ' αυτόν τον τομέα με την ανάπτυξη μοντέλων ποσοτικοποίησης των παρασιτικών εισροών [10, 16, 17]. Μέχρι σήμερα, όμως, δεν έχει διαμορφωθεί κατάλληλο θεσμικό πλαίσιο για την αντιμετώπιση του προβλήματος είτε σε εθνικό, είτε σε κοινοτικό επίπεδο [24]. Συγκεκριμένα στην Ελλάδα, από νομοθετικής άποψης, το ζήτημα είναι σχεδόν άγνωστο με μόνη εξαίρεση μιας γενικής φύσεως πρόβλεψη του Κτιριοδομικού Κανονισμού [3, 4]. Ας σημειωθεί, πάντως, ότι το πρόβλημα μπορεί να μην αφορά πολλές ευρωπαϊκές χώρες, οι οποίες διαθέτουν κατά κανόνα παντορορικά συστήματα αποχέτευσης, αφορά όμως ιδιαίτερα την Ελλάδα που στη μεγάλη πλειονότητά τους τα δίκτυα αποχέτευσης είναι χωριστικά.

2. ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΚΑΙ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗ

Η αντιμετώπιση του προβλήματος διαφοροποιείται στο στάδιο μελέτης-κατασκευής και στο στάδιο λειτουργίας. Στο στάδιο μελέτης-κατασκευής πρέπει να λαμβάνονται υπόψη από τον μελετητή οι τοπικές συνθήκες της περιοχής και να γίνεται κατάλληλη προσαύξηση της παροχής σχεδιασμού του δικτύου, για την παροχέτευση των πρόσθετων εισροών. Επιπλέον, τα υλικά κατασκευής των αγωγών, των συνδέσεων και των φρεατίων καθορίζουν ως ένα βαθμό τη συμπεριφορά του δικτύου ως προς την εισροή υπογείων και ομβρίων υδάτων. Γι' αυτό η μελέτη θα πρέπει να καθορίζει υλικά σύγχρονα και κατάλληλα για τις τοπικές συνθήκες. Τέλος, η ποιότητα της κατασκευής συχνά ευθύνεται για ένα ποσοστό των πρόσθετων εισροών στο δίκτυο. Κατά συνέπεια, η επιμελής κατασκευή αποτελεί προληπτικό μέτρο περιορισμού τους.

Στο στάδιο λειτουργίας το πρώτο βήμα για την αντιμετώπιση των παρασιτικών εισροών είναι η ανίχνευση και ο εντοπισμός τους. Ποιοτική ένδειξη της εισροής υπόγειων και ομβρίων υδάτων στο δίκτυο αποτελεί η σύγκριση της μέσης ημερήσιας παροχής ακαθάρτων σε ετήσια κλίμακα με την παροχή σε συνθήκες υψηλού υδροφόρου ορίζοντα ή κατόπιν έντονης βροχόπτωσης. Δείκτης πρόσθετων εισροών είναι και τα λειτουργικά χαρακτηριστικά της εγκατάστασης επεξεργασίας λυμάτων. Για παράδειγμα, αν παρατηρηθεί σημαντική μείωση της συγκέντρωσης BOD_5 κατά τους εαρινούς μήνες, ενδεχομένως υπόγεια νερά εισρεύσουν στο δίκτυο. Η επιβεβαίωση των ποιοτικών εκτιμήσεων και ο εντοπισμός των παρασιτικών εισροών γίνεται, συνήθως, με τις παρακάτω μεθόδους:

- επιθεώρηση φρεατίων, ειδικά κατά τη διάρκεια έντονης βροχόπτωσης,
- έλεγχος του δικτύου μέσω βιντεοσκόπησης,
- μέθοδος καπνού (smoke test),
- χρήση χρωστικών ουσιών (dye water test) και
- έλεγχος αγωγών και αρμών με εφαρμογή πίεσης (σε συν-

δυασμό με βιντεοσκόπηση).

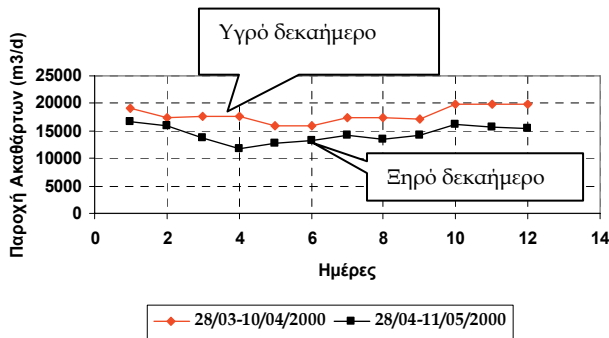
Για την αντιμετώπιση των προβλημάτων, που τυχόν εντοπίζονται, οι εναλλακτικές λύσεις που εξετάζονται είναι η εκτενής επιδιόρθωση του δικτύου και η επέκταση ή ανακατασκευή της εγκατάστασης επεξεργασίας λυμάτων. Η επιλογή γίνεται με βάση συγκριτική οικονομοτεχνική μελέτη, θεωρώντας ότι κατά την επιδιόρθωση του δικτύου θα περιοριστούν οι πρόσθετες εισροές κατά ένα ανώτατο επιδιωκόμενο ποσοστό, που συνήθως κυμαίνεται από 30 έως 50%. Σε περίπτωση που επιλεγεί ως βέλτιστη λύση η επιδιόρθωση του δικτύου, η αντιμετώπιση του προβλήματος γίνεται με στεγάνωση και ενίσχυση των φρεατίων, αντικατάσταση ή διόρθωση των αγωγών και αποσύνδεση των παράνομων συνδέσεων απαγωγής ομβρίων από κτίρια (σκεπές, αυλές και θεμέλια) από το δίκτυο ακαθάρτων. Σε ό,τι αφορά στην επιδιόρθωση των αγωγών, οι διεθνείς αναφορές συστήνουν, αντί της παραδοσιακής εκσκαφής και επανατοποθέτησης, τη χρήση νέων οικονομικότερων και ταχύτερων μεθόδων, όπως είναι η «διαμόρφωση και τοποθέτηση» (fold & form) και η «επιτόπου αντιμετώπιση» (cure in place). Η διεθνής βιβλιογραφία παρέχει πληθώρα παραδειγμάτων από πόλεις, όπου οι παρασιτικές εισροές περιορίστηκαν προσεγγίζοντας το επιδιωκόμενο ποσοστό [11, 12, 13, 18, 19, 25].

3. ΠΙΛΟΤΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΟΝ ΕΛΛΑΔΙΚΟ ΧΩΡΟ

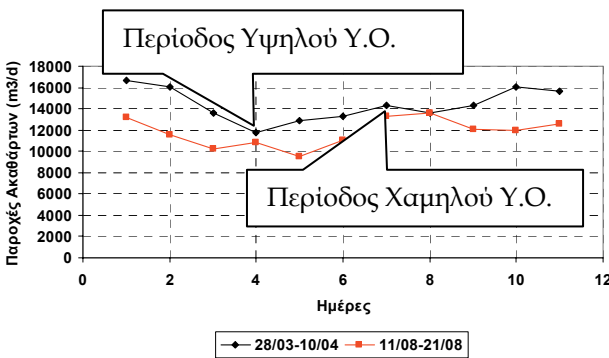
Στόχος της παρούσας εργασίας ήταν αφενός η διερεύνηση των συνθηκών σχετικά με τις παρασιτικές εισροές στην Ελλάδα και αφετέρου η ανάπτυξη μοντέλου περιγραφής και ποσοτικοποίησης των παρασιτικών εισροών στα Ιωάννινα και στην Καρδίτσα. Η περιγραφή του προβλήματος ξεκινά με την ποιοτική διερεύνηση των παρασιτικών εισροών στο δίκτυο.

3.1 Ιωάννινα

Μια πρώτη εικόνα για την ύπαρξη του προβλήματος στο δίκτυο ακαθάρτων των Ιωαννίνων δίνεται στα Σχήματα 2 και 3. Όπως φαίνεται στο συγκριτικό διάγραμμα του Σχήματος 2, οι παροχές ακαθάρτων κατά το βροχερό δεκαήμερο 28/03-10/04/2000 είναι αυξημένες συγκριτικά με τις αντίστοιχες για το ξηρό δεκαήμερο 28/04-11/05/2000. Σημειώνεται ότι τα δύο δεκαήμερα αναφέρονται σε περίοδο υψηλού υδροφόρου ορίζοντα. Παρόμοια διαδικασία ακολουθήθηκε για την περίοδο χαμηλού υδροφόρου ορίζοντα (καλοκαίρι), όπου και πάλι παρατηρήθηκε η αύξηση της παροχής για το βροχερό δεκαήμερο. Για τον διαχωρισμό των εισροών από υπόγεια ύδατα έγινε σύγκριση των ξηρών δεκαημέρων που εξετάστηκαν για την περίοδο υψηλού και χαμηλού υδροφόρου και προέκυψε το Σχήμα 3 [1, 5, 6].



Σχήμα 2: Σύγκριση παροχής ακαθάρτων στα Ιωάννινα για βροχερές και ξηρές συνθήκες με υψηλή στάθμη υδροφορέα
 Figure 2: Comparison of sanitary sewer discharge in Ioannina for dry and wet conditions with high ground water level



Σχήμα 3: Σύγκριση παροχής ακαθάρτων στα Ιωάννινα για ξηρές συνθήκες με υψηλή στάθμη υδροφορέα (χειμερινό δεκαήμερο) και χαμηλή στάθμη υδροφορέα (θερινό δεκαήμερο)
 Figure 3: Comparison of sanitary sewer discharge in Ioannina for dry conditions with high ground water level (winter period) and low ground water level (summer period)

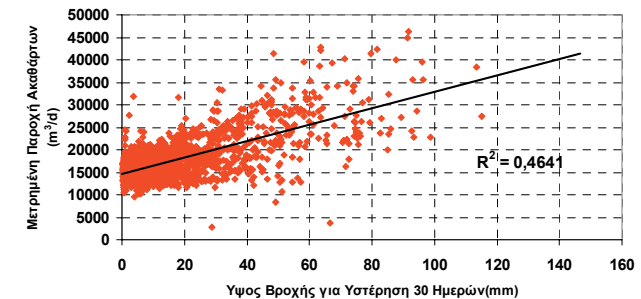
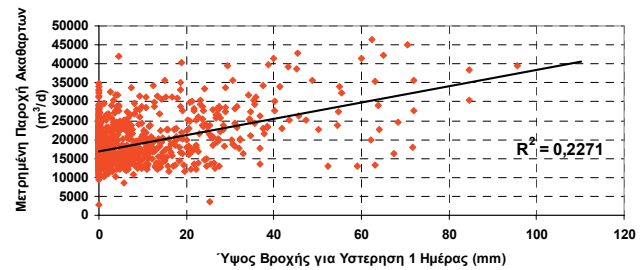
Από την ποιοτική ανίχνευση των παρασιτικών εισροών πιστοποιείται η ύπαρξη του προβλήματος. Η ποσοτική έκφραση γίνεται με την κατάστρωση ενός μοντέλου. Τα βήματα που ακολουθήθηκαν έως τη διαμόρφωση ενός τέτοιου μοντέλου είναι:

1. Συγκέντρωση και ερμηνεία λειτουργικών δεδομένων εγκατάστασης.
2. Συλλογή βροχομετρικών δεδομένων από σταθμούς εντός της λεκάνης των Ιωαννίνων ή γειτονικούς αυτής.
3. Έλεγχος συνέπειας των συλλεχθέντων βροχομετρικών δεδομένων και διόρθωση ασυνεπειών.
4. Κατάρτιση χρονοσειράς αντιπροσωπευτικής βροχόπτωσης για την περιοχή των Ιωαννίνων.
5. Συσχέτιση ύψους βροχής και παροχής εξόδου (ελλείπει δεδομένων εισόδου) από την εγκατάσταση επεξεργασίας λυμάτων.
6. Χρήση χρονοσειρών παροχής ποταμών ως δείκτη της συμπεριφοράς των υπόγειων υδάτων
7. Συσχέτιση ποτάμιων παροχών με την παροχή εξόδου (ελλείπει δεδομένων εισόδου) από την εγκατάσταση επεξεργασίας λυμάτων.

8. Συλλογή μηνιαίων τιμών υδατικής κατανάλωσης.
9. Δημιουργία μοντέλου (γραμμικής και μη γραμμικής παλινδρόμησης)-Ποσοτικά αποτελέσματα.

Βροχομετρικά δεδομένα συγκεντρώθηκαν για τους σταθμούς Πεντόλακκο, Δικόρυφο και Αεροδρόμιο Ιωαννίνων. Κατά την επεξεργασία των βροχομετρικών δεδομένων εξετάστηκαν χρονικές κλίμακες 1, 4, 5, 6, 7, 14, 30 ημερών. Στο Σχήμα 4 παρατηρείται η σχετικά υψηλή συσχέτιση ημερήσιας παροχής ακαθάρτων και αθροιστικού ύψους βροχής της ίδιας ημέρας και των προηγούμενων 30 ημερών.

Η σχετικά υψηλή συσχέτιση, ιδίως στη δεύτερη περίπτωση, καταδεικνύει τη σημαντική συμβολή των υπόγειων εισροών στην παροχή του δικτύου ακαθάρτων.



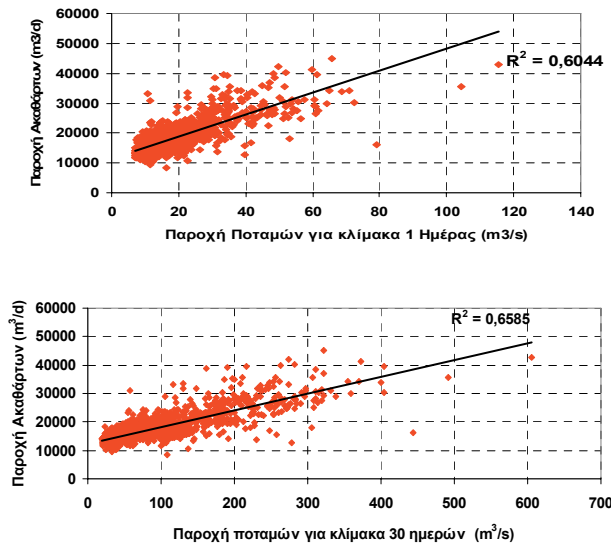
Σχήμα 4: Συσχέτιση μετρημένης παροχής ακαθάρτων – ύψους βροχής: (πάνω) για κλίμακα ημέρας και (κάτω) για κλίμακα 30 ημερών

Figure 4: Correlation of measured wastewater discharge and precipitation: (up) for daily scale and (down) for 30 days scale

Η ένδειξη για σημαντική συμβολή των υπόγειων υδάτων στη διαμόρφωση των παροχών ακαθάρτων έπρεπε να πιστοποιηθεί από τη συμπεριφορά του υδροφόρου ορίζοντα στην ευρύτερη περιοχή. Ελλείπει άλλων δεδομένων αποφασίστηκε η χρήση της παροχής των μεγάλων ποταμών της ευρύτερης περιοχής ως δείκτη της συμπεριφοράς των υπόγειων υδάτων.

Συγκεντρώθηκαν οι ημερήσιες τιμές της παροχής για τους ποταμούς Αραχθο, Λούρο και Αώο. Εξετάστηκαν και πάλι χρονικές κλίμακες 1, 4, 5, 6, 7, 14, 30 ημερών.

Στο Σχήμα 5 εικονίζεται η συσχέτιση της παροχής ακαθάρτων με την παροχή των ποταμών για κλίμακα 1 και 30 ημερών. Εδώ οι συσχετίσεις είναι ακόμη υψηλότερες και επιβεβαιώνουν τη σημαντική συμβολή των υπόγειων υδάτων στην παροχή του δικτύου ακαθάρτων.



Σχήμα 5: Συσχέτιση μετρημένης παροχής ακαθάρτων –παροχής ποταμών: (πάνω) για κλίμακα ημέρας και (κάτω) για κλίμακα 30 ημερών

Figure 5: Correlation of measured wastewater discharge and river discharge: (up) for daily scale and (down) for 30 days scale.

Για τη διαμόρφωση του μοντέλου, ως δεδομένα εισόδου θεωρήθηκαν η ημερήσια υδατική κατανάλωση (εκτιμημένη από μηνιαία δεδομένα της ΔΕΥΑ Ιωαννίνων, δεδομένου ότι δεν υπήρχαν ημερήσιες μετρήσεις), η ημερήσια βροχόπτωση και η παροχή ποταμών για κλίμακα 30 ημερών. Εξετάστηκαν οι περιπτώσεις μοντέλων γραμμικής και μη γραμμικής παλινδρόμησης. Αν και ακόμη και το γραμμικό περιέγραφε ικανοποιητικά τις παρασιτικές εισροές στο δίκτυο των Ιωαννίνων, το μη γραμμικό μοντέλο θεωρήθηκε βέλτιστο. Η τελική εξίσωση του μοντέλου, που περιγράφει τις συνιστώσες των ακαθάρτων στο δίκτυο των Ιωαννίνων είναι:

$$Q = a + f Y^h + b \Pi^c + d B^e + E \quad (3.1)$$

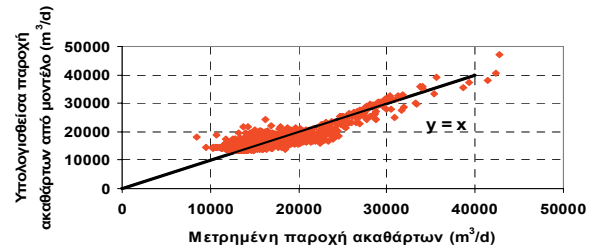
όπου Q η κανονικοποιημένη παροχή ακαθάρτων, a , b , c , d , e , f , h οι συντελεστές του μοντέλου, Π η κανονικοποιημένη παροχή ποταμών για 30 ημέρες υστέρηση, B το κανονικοποιημένο ημερήσιο ύψος βροχής, E η κανονικοποιημένη πρόσθετη συνιστώσα ομβρίων (από φιλτράρισμα χρονοσειρών) και Y η κανονικοποιημένη υδατική κατανάλωση.

Διευκρινίζεται ότι έγινε φιλτράρισμα στις κανονικοποιημένες αιχμές ακαθάρτων, θεωρώντας ότι έντονες διακυμάνσεις από μέρα σε μέρα προέρχονται από εισροές ομβρίων κατά τη διάρκεια έντονων βροχοπτώσεων. Η προκύπτουσα χρονοσειρά, στη συνέχεια, προστίθεται στη συνιστώσα των ομβρίων υδάτων που προκύπτει από το μοντέλο.

Αναλυτικά οι συνιστώσες του μοντέλου εκφράζουν:

- $a + f Y^h$: παροχή λυμάτων,
- $b \Pi^c$: εισροή υπογείων υδάτων,
- $d B^e + E$: εισροή ομβρίων υδάτων,

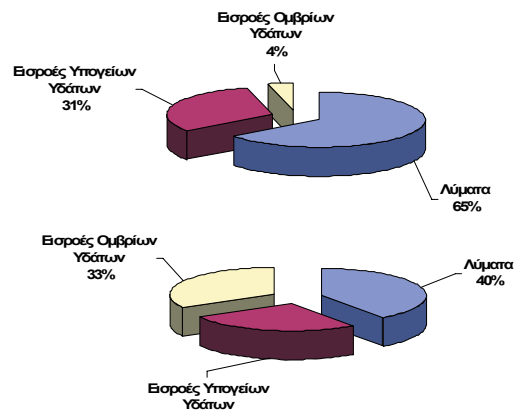
Στο Σχήμα 6 απεικονίζεται η επίδοση του μοντέλου σε σχέση με τη μετρημένη παροχή ακαθάρτων.



Σχήμα 6: Σχέση υπολογισθείσας – μετρημένης παροχής ακαθάρτων (Ιωάννινα)

Figure 6: Relation of estimated and measured sanitary sewer discharge (Ioannina)

Με βάση το μοντέλο μη γραμμικής παλινδρόμησης προέκυψε ότι οι συνιστώσες της παροχής ακαθάρτων στο δίκτυο των Ιωαννίνων σε μέση ετήσια κλίμακα δίνονται στο άνω γράφημα του Σχήματος 7. Αντίστοιχα, στο κάτω γράφημα δίνονται οι συνιστώσες της παροχής ακαθάρτων για την περίοδο που εμφανίζεται το μέγιστο 5% της παροχής ακαθάρτων, σύμφωνα με το μοντέλο.



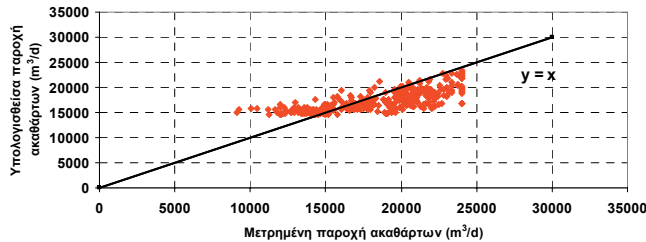
Σχήμα 7: Συνιστώσες της παροχής του δικτύου ακαθάρτων των Ιωαννίνων: (πάνω) σε μέση ετήσια κλίμακα, και (κάτω) για την περίοδο που εμφανίζεται το μέγιστο 5% των τιμών της παροχής

Figure 7: Sanitary sewer flow components in Ioannina: (up) on average annual scale and (down) for the period when the maximum 5% of the values occurs.

3.2 Καρδίτσα

Αντίστοιχη διαδικασία ακολουθήθηκε και στην πιλοτική εφαρμογή για την πόλη της Καρδίτσας. Εντούτοις, λόγω σοβαρών ελλείψεων στις μετρήσεις των παροχών ακαθάρτων, έπρεπε να γίνει πρώτα εκτίμηση της ημερήσιας παροχής που εισέρχεται την εγκατάσταση επεξεργασίας και στη συνέχεια να αναπτυχθεί το μοντέλο [2]. Σημειώνεται ότι η εκτίμηση των ημερήσιων παροχών ακαθάρτων έγινε απευθείας από τις

ταινίες καταγραφής του παροχομέτρου, χωρίς χρήση εξειδικευμένου λογισμικού. Η παραμετρική εξίσωση του μοντέλου για την Καρδίτσα είναι ίδια με εκείνη των Ιωαννίνων (3.1).

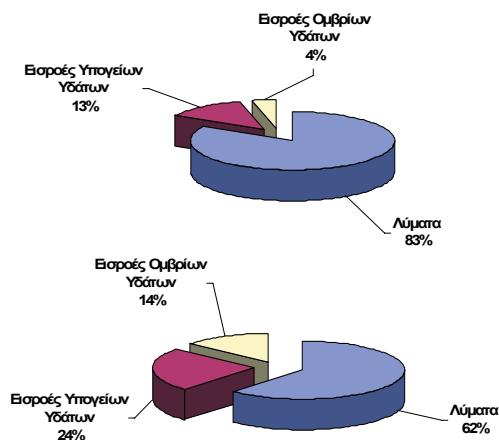


Σχήμα 8: Σχέση υπολογισθείσας- μετρημένης παροχής ακαθάρτων (Καρδίτσα)

Figure 8: Relation of estimated and measured sanitary sewer discharge (Karditsa)

Στο Σχήμα 8 εικονίζεται η επίδοση του μοντέλου σε σχέση με τη μετρημένη παροχή.

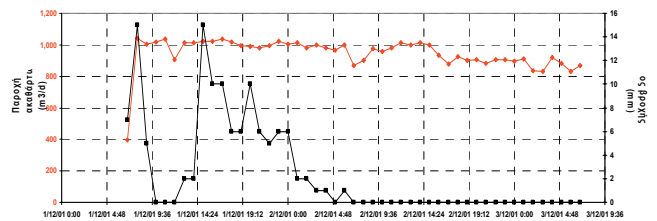
Αναλογικά, προέκυψαν και οι συνιστώσες της παροχής ακαθάρτων για τη μέση τιμή και το μέγιστο 5% της παροχής ακαθάρτων, όπως φαίνονται στο Σχήμα 9.



Σχήμα 9: Συνιστώσες της παροχής του δικτύου ακαθάρτων της Καρδίτσας: (πάνω) σε μέση ετήσια κλίμακα, και (κάτω) για την περίοδο που εμφανίζεται το μέγιστο 5% των τιμών της παροχής

Figure 9: Sanitary sewer flow components in Karditsa: (up) on average annual scale and down for the period when the maximum 5% of the values occurs

Σημειώνεται ότι, κατά την εκτίμηση της παροχής ακαθάρτων απευθείας από τις ταινίες καταγραφής, ήταν δυνατή η ανάλυση σε ωριαία βάση της παροχής ακαθάρτων. Χρησιμοποιώντας και ωριαία δεδομένα για τη βροχόπτωση από τον βροχογράφο του σταθμού Καρδίτσας, έγινε σύγκριση των ωριαίων τιμών παροχής ακαθάρτων και βροχόπτωσης, η οποία και απεικονίζεται στο Σχήμα 10 για την περίοδο 1-3/12/2001. Παρατηρείται ότι τις επόμενες ώρες μετά τη βροχόπτωση η παροχή ακαθάρτων αγγίζει τη μέγιστη τιμή των 1000 m³/h. Επιπλέον, επισημαίνεται ότι η παροχή ακαθάρτων αρχίζει να μειώνεται 6 ώρες μετά τη διακοπή της βροχής, γεγονός που επιβεβαιώνει την εισροή ομβρίων υδάτων στο δίκτυο.



Σχήμα 10: Ωριαία διακύμανση παροχής ακαθάρτων
Figure 10: Hourly variation of wastewater discharge

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Το πρόβλημα των παρασιτικών εισροών στον ελλαδικό χώρο είναι σημαντικό, όπως αποδεικνύεται από τη διερεύνηση που έγινε για τα Ιωάννινα και την Καρδίτσα. Χαρακτηριστικά σημειώνεται ότι οι παρασιτικές εισροές στα Ιωάννινα αποτελούν το 35% της παροχής λυμάτων σε μέση ετήσια κλίμακα, ενώ στην Καρδίτσα, αντίστοιχα, αποτελούν το 17%. Όμως, στις περιόδους αιχμής (5% του συνολικού χρόνου) τα μεγέθη αυτά φτάνουν το 67% και 38% της παροχής λυμάτων, αντίστοιχα. Η διαφοροποίηση των κλιματικών και υδρογεωλογικών συνθηκών μεταξύ των δύο πόλεων οδηγεί σε αντίστοιχη διαφοροποίηση των παρασιτικών εισροών. Επιπλέον, στη διαμόρφωση των παρασιτικών εισροών υπεισέρχονται αβέβαιοι παράγοντες, όπως η συμμόρφωση ή μη του πληθυσμού με το θεσμικό πλαίσιο, η επιτήρηση των δικτύων από τους αρμόδιους φορείς κτλ, γεγονός που διαφοροποιεί ακόμα περισσότερο τις υπολογισθείσες εισροές Έτσι, στα Ιωάννινα οι βροχές είναι περισσότερες απ’ ό,τι στην Καρδίτσα, ενώ φαίνεται ότι και το πρόβλημα των παράνομων παροχετεύσεων ομβρίων είναι μεγαλύτερο. Στο σημείο αυτό επισημαίνεται η δυσχέρεια με την οποία έγινε η εκτίμηση της τιμής της παροχής ακαθάρτων στην περίπτωση της Καρδίτσας. Η επισημάνση αυτή υπογραμμίζει τη σημαντική έλλειψη δεδομένων στις ελληνικές πόλεις. Επιπλέον, αξίζει να αναφερθεί ότι στο πλαίσιο αυτής της έρευνας έγινε προκαταρκτική εξέταση στο αποχετευτικό δίκτυο του Αργους-Ναυπλίου, όπου και διαφάνηκε να υπάρχουν αντίστοιχα προβλήματα. Με βάση τα αποτελέσματα της διερεύνησης και του μοντέλου συμπεραίνεται ότι η καλύτερη εκτίμηση και αντιμετώπιση των παρασιτικών εισροών αναδεικνύονται σε επιτακτικά προβλήματα που θα πρέπει να διερευνηθούν περαιτέρω με στόχο τόσο τη σύνταξη κατάλληλων προδιαγραφών σχεδιασμού, όσο και την ανάπτυξη μεθόδων περιορισμού τους σε υφιστάμενα δίκτυα.

5. ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Πολύτιμη στη συγκέντρωση των δεδομένων και στην κατανόηση της λειτουργίας των δικτύων ήταν η συμβολή των ΔΕΥΑ Ιωαννίνων και Καρδίτσας, υπό την επίβλεψη των οποίων έλαβε χώρα η παρούσα ερευνητική εργασία. Ειδι-

κότερα, ευχαριστίες εκφράζονται στον διευθυντή της ΔΕΥΑ Ιωαννίνων κ. Κ. Γιωτάκη και τον διευθυντή της ΔΕΥΑ Καρδίτσας κ. Τ. Καρελά, καθώς και τους μηχανικούς κκ. Παπαθανασίου, Ρήγα, Βαρέση και Μεγίρ για τη σημαντικότερη συνεισφορά, καθώς και στον λέκτορα κ. Ι. Στεφανάκο για τις πολύτιμες συμβουλές του. Ευχαριστούμε τους αξιολογητές και ιδιαίτερα τον ανώνυμο κριτή Γ για την πολύ προσεκτική ανάγνωση του κειμένου και τις λεπτομερείς διορθώσεις και υποδείξεις του.

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ:

1. Ανδρεαδάκης Α., **Καταγραφή, αξιολόγηση και ιεράρχηση αναγκαίων επεμβάσεων στην υφιστάμενη μονάδα των Ιωαννίνων**, 2002, σελ. 1-25.
2. ΔΕΥΑ Καρδίτσας, **Μελέτη Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων έργου αποχέτευσης ακαθάρτων περιοχών Δ.Δ. Καρδίτσομαγούλας και Αρτεσιανού Δήμου Καρδίτσας**.
3. Κτηριοδομικός Κανονισμός, **Απόφαση 3046/304**, 1988.
4. Κτηριοδομικός Κανονισμός, **ΦΕΚ 59 Δ', Άρθρο 26** 1989.
5. ΥΒΕΤ- Διεύθυνση Υδατικού Δυναμικού και Φυσικών Πόρων – ΙΓΜΕ-ΕΜΠ Τομέας ΥΠΥΘΕ- DELFT HYDRAULICS, **Συνδυασμένη διαχείριση υδάτων Λούρου και Αράχθου**, 1986.
6. ΥΒΕΤ- Διεύθυνση Υδατικού Δυναμικού και Φυσικών Πόρων – ΙΓΜΕ-ΕΜΠ Τομέας ΥΠΥΘΕ- ΑΝΑΛΥΣΗ ΟΙΚΟΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ, **Μελέτη –Πρότυπος για τη Διαχείριση των υδατικών πόρων του υδατικού διαμερίσματος Ηπείρου**, 1993.
7. ASCE, APWA, WEF, **Financing and Charges for Wastewater Systems**, 1984.
8. American Society of Civil Engineers (ASCE) & Water Pollution Control Federation (WPCF), **Gravity Sanitary Sewer Design and Construction, ASCE No60, WPCF No FD – 5**, 1982.
9. Barry Ewald & Dale Kratzer, **Sewer System Savings: 7 Steps to Establish an Effective I/I Program**, Pennsylvanian Magazine, τεύχος Οκτωβρίου 2000, σελ. 1-7.
10. Belhadj N., Joannis C., Raimbault G., **Modeling of rainfall induced infiltration into separate sewerage**, Water Science and Technology, Volume 32 Issue 1, 1995, σελ. 161-168.
11. City of Johnstown Bureau of Sewage, **Excessive Infiltration and Storm Sewer Connection**, 1991, σελ. 23-25..
12. Commonwealth of Massachusetts, **Guidelines for Performing I/I Analyses and Sewer Evaluation Survey**, 1993, σελ. 1-55..
13. Commonwealth of Massachusetts, **Interim I/I Policy**, 2001, σελ. 1-3.
14. EPA, **I/I Analysis and Project Certification**, Office of Municipal Pollution Control Washington DC, Ecology Publication No 97-03, 1985, σελ. 1-8.
15. EPA, **National Conference on Sanitary Sewer Overflows**, EPA/625/R-96/007, Office of Water, Washington, DC 1996.
16. Fernandez B.R. & Gresh J.S., **Groundwater migration in Sewer Trenches**, Florida Water Resources Journal, April 1998, σελ.15-16.
17. Gustafsson, Hernebring & Hammarlund, **Continuous Modelling of I/I in Sewers with MouseNAM**, 3rd DHI Software Conference, Sweden 1999, σελ. 10-20.
18. Austin City Connection, **Infiltration / Inflow, Issue Paper, Austin Texas**, 2001, σελ. 1-5.
19. Kracht O. & Gujer W., **Quantification methods for infiltration into urban sewer systems by natural tracers**, ETH 2003, σελ. 1-7.
20. Louisiana Department of Environment, **Guidance for evaluating Infiltration/ Inflow for State Revolving Projects**, 2001, σελ 1-7.
21. Liu & Vipulanandan, **Verification of Infiltration at Sewer Pipe Joints**, University of Houston 1998, σελ 1-8.
22. Liu & Vipulanandan, **Costing for Infiltration in Sanitary Sewer System**, University of Houston 1998, σελ. 1-3.
23. Mark G. Wade, **Controlling I/I in Wastewater Collection Systems**, Wade Technical Papers 2002, σελ. 1-16..
24. Mark G. Wade, **SSES & I/I Studies**, Wade Technical Papers 2002, σελ 1-7.
25. Martz, **Υδραυλική των οικισμών, Μέρος 2, Αποχετεύσεις**, Μετάφραση: Γ. Χατζηθεοδόρου, Μ. Γκιούρδας, Αθήνα 1970

Ι. Ζαλαχώρη

Πολιτικός Μηχανικός, Κηφισού 18, Κηφισιά

Δ. Κουτσογιάννης

Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΜΠ, Ηρώων Πολυτεχνείου 5, Ζωγράφου

Α. Ανδρεαδάκης

Καθηγητής ΕΜΠ, Ηρώων Πολυτεχνείου 5, Ζωγράφου

Extended Summary

Infiltration and Inflow in Sewer Systems: Identification & Quantification in Greece

I. ZALACHORI
Civil Engineer NTUA

D. KOUTSOYIANNIS
Civil Engineer,
Associate Professor NTUA

A. ANDREADAKIS
Civil Engineer,
Professor NTUA

Abstract

Infiltration and inflow (I/I) are known to be two of the major problems in sewer systems. According to literature reviews, infiltration and inflow are often estimated as 100% of sewage flow, causing major malfunctions in both the system and the wastewater treatment plant. In some countries proper regulation has been applied; however, in others research is still in progress. Since 1970, the United States has developed a detailed legislation for the identification and rehabilitation of the problem, while in Europe various research programs are currently ongoing.

In this study, two pilot projects were conducted in Greece, in the cities of Ioannina and Karditsa. In the first phase of the project, infiltration and inflow conditions were identified for each city. A model was then developed for the quantification of I/I. Last, the reliability of the model was validated and the components of sewage were analyzed. The general conclusion is that the quantity of I/I is significant, exceeding the typical assumptions in the design studies of sewer networks in Greece.

1. INTRODUCTION

Infiltration refers to groundwater that leaks into the sanitary sewer system through cracked and/or improperly connected pipes. Inflow refers to clear water from rain and snowmelt that enters the sewer system via destroyed manhole covers, illegal connections of downspouts and sump pumps, etc. Various problems are caused to both the sewer system and the wastewater treatment facility by infiltration/ inflow, such as:

- overload of sewer pipes,
- overflowing of sewer pipes,
- inefficient wastewater treatment,
- increase in transportation and treatment cost,
- unsanitary conditions affecting public health, and
- detrimental effects on both the rural and urban environment.

As an example, Figure 1 shows the additional total

treatment cost due to infiltration and inflow for the case of a city of 120,000 inhabitants [7, 21, 22].

Since 1970 several I/I surveys have taken place in sewer systems in the United States of America, the majority of which were conducted under the supervision of the Environmental Protection Agency (USEPA). In Europe, extensive research has begun since the early 1990s into the development of quantification models for infiltration and inflow [10, 16, 17, 24]. Specifically in Greece, there are neither appropriate regulations concerning I/I nor efficient modeling approaches [3, 4].

2. IDENTIFICATION & REHABILITATION

The process of eliminating I/I from sewer systems must be divided between the stage of design-construction and the actual operation period of the facility. During the design phase, engineers should take under consideration the local conditions; in the estimation of the design discharge they should allow for a potential periodic increase in wastewater discharge. An important parameter in the first phase is the selection of materials, as well as the quality of construction.

During the operation period the primary interest is focused on the identification and localization processes. A rather straightforward qualitative method for the identification of infiltration and inflow is the comparison of the mean daily discharge on an annual scale to the daily discharge during high groundwater level periods or directly after rainfall events. An alternative method is based on the functional characteristics of the wastewater treatment plant. For example in the case that a significant decrease in BOD₅ concentration is observed in the obtained data series, especially during the spring months, that might indicate groundwater infiltrating the sewer system.

The qualitative observations obtained from the above methods should be validated in situ using various methods:

- investigation of manholes, particularly during rainfall events,
- video inspection of the sewer system,
- smoke tests,
- dye water tests,
- video inspection of pipes and junctions applying pressure.

The identification of excessive infiltration and inflow in sewer networks must be followed by sewer system evaluation surveys and an effective rehabilitation plan. The techniques suggested by the international literature are focused on dealing with the problem either in the sewer network or at the wastewater treatment facility. In the first case extensive rehabilitation of the sewer system is most commonly suggested. The proposed methods are mainly the sealing of manhole covers and pipe joints, the replacement and/or the rehabilitation of sewer pipes, and the disconnection of illegal downspouts and sump pumps from the sewer system. In addition, international references suggest that more modern and cost efficient methods such as “fold & form” and “cure in place” can be applied for the elimination of infiltration and inflow. In the case of the wastewater treatment plant; the expansion or the redesign of the facility is proposed. However, the selection of the optimum rehabilitation method is based on a cost-effective analysis, given that the maximum economically acceptable percentage of infiltration/ inflow elimination is between 30-50% [11, 12, 13, 18, 19, 25].

3. CASE STUDIES

As shown in Figure 2, for the sewer system of Ioannina, wastewater discharges for the wet period from 28/03/2000 until 10/04/2000 are increased compared to the dry period of 28/04–11/05/2000. Both period intervals analyzed are referring to high ground water level (spring). An investigation was conducted also for a low groundwater period (summer) yielding similar results. In order to distinguish infiltration from inflow, dry weather discharges between high and low ground water level were compared (Figure 3).

The qualitative results discussed above give a preliminary verification of the fact that I/I exist. A model was developed to quantify the results of this preliminary analysis. The steps involved in the modeling procedure are as follows:

- 1) Collection of inflow, outflow and operation data for the wastewater treatment facility.
- 2) Collection of precipitation data from gauges in the Ioannina basin or in neighboring basins.
- 3) Consistency test of precipitation data and correction for inconsistencies.
- 3) Creation of time series for the representative precipitation for Ioannina.
- 4) Correlation of precipitation and wastewater discharge.

- 5) Collection and interpretation of river discharge data as an indication of groundwater variation.
- 6) Correlation of river discharge and wastewater discharge for the wastewater facility.
- 7) Collection of monthly water consumption data.
- 8) Development of a model, using both linear and nonlinear forms.

Wastewater discharge was correlated to rainfall heights at several timescales: 1, 4, 5, 6, 7, 14, 30 days. The maximum correlation between precipitation data and wastewater discharge occurred at the timescale of 30 days. This observation indicates the significant contribution of groundwater as a component of wastewater discharge (Figure 4).

The indication of groundwater as a significant portion of wastewater discharge can be verified through the variations in groundwater table level in the greater area. Due to lack of other data, river discharge was used as an index of groundwater variation. Daily river discharge data were collected for three main rivers of the area: Arachthos, Louros and Aaos. Again, wastewater discharge was correlated at timescales of 1, 4, 5, 6, 7, 14, 30 days. The maximum correlation between precipitation data and waste discharge occurred at the timescale of 30 days. This corroborates the finding of the previous step, according to which groundwater variation has an important effect on wastewater discharge. Figure 5 depicts the correlation for timescales of 1 and 30 days.

Based on the above findings, a regression model was developed with the following input data: the one-day rainfall, the daily average of water consumption, and the river flow data for the period of 30 days. It should be mentioned that both linear and nonlinear forms were examined and it was determined that both models describe the performance of the Ioannina sewer system in a relatively sufficient way. The nonlinear model was optimal and is given as follows:

$$Q = a + f Y^h + b \Pi^c + d B^e + E \quad (1.1)$$

where: Q is the standardized wastewater discharge, a, b, c, d, e, f, h are the model parameters, Π is the standardized river flow discharge for a scale of 30 days, B is the standardized rainfall for daily scale, Y is the standardized water consumption and E is an additional rainfall component. Analytically the model components are interpreted as follows:

- $a + f Y^h$: wastewater discharge
- $b \Pi^c$: infiltration
- $d B^e + E$: inflow

It should be mentioned that the extreme peaks in the wastewater discharge series were considered mainly as inflow during heavy rainfall; this was assumed to be component E in the model. Figure 6 shows the model's performance in comparison to the measured wastewater discharge data series.

A similar model was developed for the case of Karditsa.

Figure 8 depicts the model's performance, while Figure 9 shows the components of wastewater as estimated from the model.

4. CONCLUSIONS

From the research conducted for the sewer systems of Ioannina and Karditsa, it was verified that infiltration and inflow is a major problem of sewer networks in Greece. In the sewer system of Ioannina 35% of the total sewer discharge on an annual scale consists of infiltration and inflow, while in Karditsa for the same timescale this percentage is 17%. Moreover, during extreme events, meaning periods when the maximum 5% of the values occurs, infiltration and inflow account for the 67% and 38% of the total wastewater discharge in Ioannina and Karditsa,

respectively. The difference between the two cities is mainly due to the different climatic and geological conditions. In addition, other stochastic factors, such as surveillance of the sewer network, etc., contribute to the rates of infiltration and inflow in the two cities.

However, it should be mentioned that we experienced significant difficulties during the estimation of total wastewater discharge in Karditsa, which also underlines the important lack of databases in the Greek cities. In addition to the research conducted for the cases of Ioannina and Karditsa, a preliminary investigation took place for the sewer system of Argos-Nafplio, during which the existence of infiltration and inflow in the local sewer network was verified. Based on both the results of the in situ investigations and the model developed, it was clear that infiltration and inflow is a significant component of wastewater and thus there is a need to deal with this problem.

Ioanna Zalachori

Civil Engineer, Kifisou 18 Kifisia

Demetris Koutsoyiannis

Associate Professor NTUA, Heron Polytechniou 5 Zographou

Andreas Andreadakis

Professor NTUA, Heron Polytechniou 5 Zographou