

# Σχεδιασμός Διαχυτήρων για Μικρούς Οικισμούς με τη Χρήση Εύκαμπτων Σωλήνων

Π. Β. ΑΓΓΕΛΙΔΗΣ

Λέκτορας Δ.Π.Θ.

Π. Θ. BANTZOY

M.Sc. Πολιτικός Μηχανικός

## Περίληψη

Στην εργασία αυτή μελετάται και προτείνεται μια νέα μέθοδος διάθεσης υγρών αποβλήτων με τη χρήση εύκαμπτων σωλήνων, κατάλληλη για ξενοδοχειακές μονάδες, παραθαλάσσιους οικισμούς, κοινότητες και μικρούς δήμους. Σύμφωνα με την προτεινόμενη μέθοδο ο διαχυτήρας διαμορφώνεται από τις απολήξεις ενός αριθμού υποβρύχιων αγωγών μικρής διατομής από εύκαμπτους σωλήνες, που τερματίζουν διαδοχικά επί ευθείας σε κατάλληλες αποστάσεις. Η προτεινόμενη μέθοδος παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα, όπως μεγάλες αραιώσεις, ταχύτητα και ευκολία συναρμολόγησης και πόντισης των εύκαμπτων αγωγών με πολύ χαμηλότερο κόστος κατασκευής. Στόχος της παρούσας εργασίας είναι να διερευνηθεί αρχικά η προτεινόμενη μέθοδος, να δοθεί η μεθοδολογία σχεδιασμού και σε τελική φάση να γίνει η σύγκριση της προτεινόμενης λύσης με την κλασική ως προς το τεχνικό και οικονομικό μέρος.

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ένα σημαντικό αντικείμενο της διαχείρισης των αστικών υγρών αποβλήτων παραθαλάσσιων πόλεων και οικισμών αποτελεί η διάθεση των εκροών τους, δηλαδή των επεξεργασμένων ή μη υγρών αποβλήτων σε υδατικούς αποδέκτες μέσα από υποβρύχιους αγωγούς σε συνδυασμό με διαχυτήρες. Ο υποβρύχιος αγωγός διαμέτρου έως και 1 m, κατάλληλος για τις περισσότερες περιπτώσεις στον ελληνικό χώρο, συνήθως επιλέγεται από πολυαιθυλένιο HDPE, για πίεση λειτουργίας τουλάχιστον 10 atm. Το HDPE (υψηλής πυκνότητας, 0.945 – 0.965 gr/cm<sup>3</sup>) έχει ευλυγισία, υψηλή αρχική αντοχή σε μηχανική καταπόνηση και υψηλή αντοχή σε χημική διάβρωση. Το HDPE δεν σκουριάζει, δεν διαβρώνεται και δεν χάνει το πάχος του τοιχώματός του από την επίδραση χημικών ή ηλεκτρικών αντιδράσεων, όταν βυθίζεται σε θαλασσινό νερό ή περιέχει αστικά υγρά απόβλητα. Επίσης, δεν υποστηρίζει ούτε επηρεάζεται από την ανάπτυξη οργανισμών πάνω του.

Στην εργασία αυτή μελετάται και προτείνεται μια νέα μέθοδος διάθεσης υγρών αποβλήτων με τη χρήση εύκαμπτων σωλήνων από το ίδιο υλικό HDPE, που παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον για τον ελληνικό χώρο. Σύμφωνα με

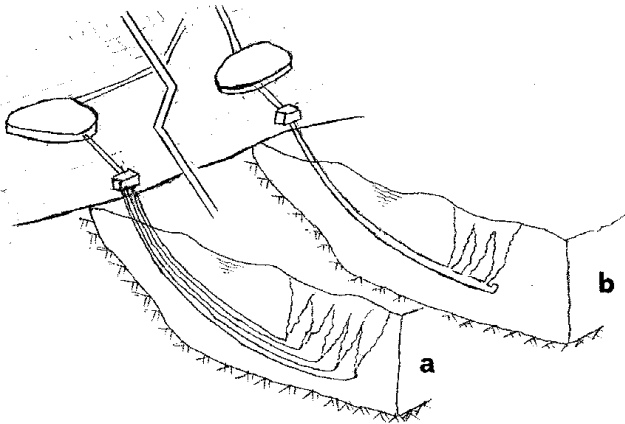
την προτεινόμενη μέθοδο ο διαχυτήρας διαμορφώνεται από τις απολήξεις ενός αριθμού υποβρύχιων αγωγών μικρής διατομής από εύκαμπτους σωλήνες, που ξεκινούν από το φρεάτιο φόρτισης και τερματίζουν διαδοχικά επί ευθείας σε κατάλληλες αποστάσεις, αντί της χρήσης μιας διατομής υποβρύχιου αγωγού από πολυαιθυλένιο HDPE, που το τελευταίο τμήμα του αποτελεί το διαχυτήρα. Η προτεινόμενη λύση παρουσιάζει επιπρόσθετα πλεονεκτήματα, όπως ταχύτητα και ευκολία συναρμολόγησης και πόντισης των εύκαμπτων αγωγών με πολύ χαμηλότερο κόστος κατασκευής. Στόχος της παρούσας εργασίας είναι να διερευνηθεί αρχικά η πρόταση διάθεσης των λυμάτων για μικρούς οικισμούς με τη χρήση εύκαμπτων σωλήνων, να δοθεί η μεθοδολογία σχεδιασμού και σε τελική φάση να γίνει η σύγκριση της προτεινόμενης λύσης με την κλασική (χρήση ενός υποβρύχιου αγωγού – διαχυτήρα) ως προς το τεχνικό και οικονομικό μέρος.

## 2. ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΙ

ε: ύψος τραχύτητας αγωγού  
 ξ: αδιάστατη παράμετρος  
 $\rho_a$ : πυκνότητα υγρού αποδέκτη  
 $\rho_0$ : αρχική πυκνότητα λυμάτων στην εκροή  
 d: διάμετρος θυρίδων (οπών) διαχυτήρα  
 D: διάμετρος οπής διάθεσης λυμάτων  
 f: συντελεστής τριβής  
 $F_0$ : αρχικός πυκνομετρικός αριθμός Froude  
 g: επιτάχυνση της βαρύτητας  
 $h_f$ : απώλειες ενέργειας λόγω τριβών  
 Re: αριθμός Reynolds  
 L: μήκος υποβρύχιου αγωγού  
 $s_m$ : ελάχιστη αξονική αραιώση  
 $U_0$ : αρχική ταχύτητα λυμάτων στην εκροή  
 V: μέση ταχύτητα ροής στον υποβρύχιο αγωγό  
 w: πλάτος ισοδύναμης σχισμής διδιάστατης ροής  
 x: κατακόρυφη απόσταση από σημείο διάθεσης λυμάτων

### 3. ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΔΙΑΧΥΤΗΡΑ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΕΥΚΑΜΠΤΩΝ ΣΩΛΗΝΩΝ

Έστω ο διαχυτήρας, που διαμορφώνεται από τις απολήξεις ενός αριθμού υποβρύχιων εύκαμπτων αγωγών μικρής διατομής, που ξεκινούν από το φρεάτιο φόρτισης και τερματίζουν διαδοχικά επί ευθείας σε κατάλληλες αποστάσεις, όπως φαίνεται στο σχήμα 1a. Δηλαδή αντί της χρήσης μιας διατομής υποβρύχιου αγωγού από πολυαιθυλένιο HDPE μεγέθους Φ300 (σχήμα 1b), που το τελευταίο τμήμα αποτελεί το διαχυτήρα, είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί ένας αριθμός σωλήνων μικρών διατομών της τάξεως Φ63 από εύκαμπτο υλικό, που διατίθεται σε κουλούρες, οι οποίοι μεταφέρουν την ίδια συνολική παροχή και τερματίζουν διαδοχικά επί ευθείας.



Σχήμα 1: Σχηματική απεικόνιση: α) της νέας προτεινόμενης μεθόδου και β) της κλασικής λύσης διάθεσης υγρών αποβλήτων.

Figure 1: Graphical representation of: a) new proposed outfall design method and b) classical wastewater diffuser outfall.

Στη συνέχεια θα διερευνηθεί η βέλτιστη γεωμετρία διάθεσης (μορφή διαχυτήρα) αναφορικά με την επιτυγχάνομενη αραιώση. Θα υποθεθεί θάλασσα χωρίς στρωμάτωση (ομογενές περιβάλλον), οπότε τα λύματα φθάνουν στην επιφάνεια της θάλασσας.

Επιπλέον υποτίθεται πλήρης απουσία ρευμάτων. Θα εξεταστούν οι εξής γεωμετρίες διάθεσης: α) αξισυμμετρική ροή, δηλαδή μεγάλη απόσταση εκροών διάθεσης, ώστε να μην επικαλύπτονται οι κώνοι ρύπανσης, και β) διδιάστατη ροή, δηλαδή οι εκροές βρίσκονται σε κατάλληλη απόσταση, ώστε οι κώνοι ρύπανσης να επικαλύπτονται σε κάποιο βάθος και η δημιουργούμενη ροή να είναι ως να προέρχεται από μία σχισμή. Για κάθε μία από τις προαναφερθείσες περιπτώσεις τίθεται επίσης το ερώτημα: πότε επιτυγχάνεται μεγαλύτερη αραιώση: α) όταν ο κάθε εύκαμπτος σωλήνας διαθέτει τα λύματα από μία οπή ή β) όταν ο κάθε εύκαμπτος σωλήνας διαθέτει τα λύματα από δύο οπές.

#### 3.1. Αξισυμμετρική ροή

Έστω ότι επιλέγονται από το εμπόριο εύκαμπτοι αγωγοί από ΗΡDΕ εξωτερικής διαμέτρου 63 mm και πάχους τοιχώματος 5,8 mm, οι οποίοι διατίθενται σε ρολούς των 100 m. Ας σημειωθεί ότι διατίθενται σε ρολούς μέχρι τη διάμετρο Φ125. Στη συνέχεια θα γίνει ο υπολογισμός της αραιώσης για διάθεση των λυμάτων μέσω των εύκαμπτων αυτών σωλήνων που τερματίζουν μεν διαδοχικά επί ευθείας γραμμής (σχήμα 1a), αλλά απέχουν ικανή απόσταση μεταξύ τους, ώστε οι κώνοι ρύπανσης να μην επικαλύπτονται και συνεπώς η δημιουργούμενη ροή από κάθε οπή να είναι αξισυμμετρική. Ο υπολογισμός της επιτυγχάνομενης αραιώσης σε οποιαδήποτε απόσταση από την εκροή θα γίνει τόσο με το έμπειρο σύστημα CORMIX όσο και με την ακόλουθη αναλυτική σχέση [1]:

$$s_m = 0.205 \left( \frac{x}{D} \right) \left( 1 + 0.246 \left( \frac{x}{D} \right)^2 F_0^{-2} \right)^{1/3} \quad (3.1)$$

όπου  $s_m$  είναι η αραιώση οριζόμενη ως το πηλίκο της αρχικής συγκέντρωσης  $c_0$  ενός ρύπου προς την επιτυγχάνομενη συγκέντρωση  $c_m$  στον άξονα της ροής σε κατακόρυφη απόσταση  $x$  από το σημείο διάθεσης,  $D$  είναι η διάμετρος της οπής και  $F_0$  είναι ο αρχικός αριθμός Froude, που ορίζεται:

$$F_0 = \frac{U_0}{\sqrt{\frac{\rho_a - \rho_o}{\rho_o} g D}} \quad (3.2)$$

όπου  $U_0$  είναι η αρχική ταχύτητα των λυμάτων,  $g$  είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας,  $\rho_a$  είναι η πυκνότητα του περιβάλλοντος και  $\rho_o$  είναι η πυκνότητα των λυμάτων.

Επειδή, όπως προκύπτει από τις παραπάνω εξισώσεις (3.1) και (3.2), η αραιώση εξαρτάται από την αρχική διάμετρο διάθεσης και την αρχική ταχύτητα, κρίνεται σκόπιμο να διερευνηθεί επιπρόσθετα για το ενδεχόμενο επίτευξης μεγαλύτερης αραιώσης η διάταξη, όπου ο κάθε εύκαμπτος σωλήνας καταλήγει να διαθέτει τα λύματα σε δύο οπές διαμέτρου  $d$  (αντί μίας) και συνολικού εμβαδού ίσου με το εμβαδόν της διατομής του εύκαμπτου σωλήνα διαμέτρου  $D$ . Συνεπώς θα εξετασθούν στη συνέχεια δύο γεωμετρίες διάθεσης: α) ο κάθε εύκαμπτος αγωγός Φ63 καταλήγει να διαθέτει τα λύματα σε μία οπή εσωτερικής διαμέτρου  $D=6.3-2 \times 0.58=5.14$  cm και β) ο κάθε εύκαμπτος αγωγός Φ63 διαθέτει τα λύματα σε δύο οπές, συνολικού εμβαδού όσο της περίπτωσης (α) και διαμέτρου  $d$ , η οποία ισούται:

$$\pi D^2/4 = 2(\pi d^2/4) \Rightarrow d = D/2^{0.5} = 5.14/2^{0.5} = 3.63 \text{ cm} \quad (3.3)$$

Με τη χρήση τόσο του έμπειρου συστήματος CORMIX [2] όσο και της αναλυτικής εξίσωσης (3.1) κατασκευάζεται

το διάγραμμα του σχήματος 2, υποθέτοντας ημερήσια κατανάλωση νερού 200 λίτρα ανά ημέρα και άτομο και βάθος διάθεσης λυμάτων 20 m. Το σχήμα αυτό αναφέρεται σε ένα διαχυτήρα, που διαμορφώνεται από τις απολήξεις έξι (6) εύκαμπτων σωλήνων και δίνει την αραιώση για μεταβολή του αριθμού των κατοίκων από 700 σε 7.000. Παρατηρείται κατ' αρχήν ότι η αναλυτική σχέση (3.1) υπερεκτιμάει ελαφρώς την αραιώση σε σχέση με το έμπειρο σύστημα CORMIX. Όμως και για τους δύο τρόπους υπολογισμού προκύπτει πολύ μεγάλη αραιώση (π.χ. της τάξεως των 3.000 για 1.000 κατοίκους). Προκύπτει ακόμη ότι η αραιώση αυξάνεται κατά 1.58 φορές, όταν η διάθεση γίνεται μέσω δύο οπών διαμέτρου  $d=3.63$  cm, παρά από μία οπή διαμέτρου  $D=5.14$  cm. Το ίδιο ακριβώς συμπέρασμα (και ποσοτικά) προκύπτει, αν κατασκευαστούν αντίστοιχα διαγράμματα του σχήματος 2, αλλά με 1, 2, 3, 4 ή 5 εύκαμπτους αγωγούς.

### 3.2. Διδιάστατη ροή

Θα διερευνηθεί στη συνέχεια η περίπτωση της διδιάστατης ροής, της ροής δηλαδή που δημιουργείται, όταν οι εκροές απέχουν μεταξύ τους κατάλληλη απόσταση, ώστε οι κώνοι ρύπανσης να επικαλύπτονται σε κάποιο βάθος και το δημιουργούμενο πεδίο ροής να προσομοιάζει με τον τρόπο αυτό το δημιουργούμενο από μία σχισμή με ισοδύναμο πλάτος  $w$ .

Ο υπολογισμός της επιτυγχανόμενης αραιώσης σε οποιαδήποτε απόσταση από την εκροή θα γίνει τόσο με το έμπειρο σύστημα CORMIX όσο και με τη χρήση της ακόλουθης αναλυτικής σχέσης [3]:

$$s_m = 0.54F_0^{2/3} (0.83 + 0.106\xi^{3/2} (1 + 0.253\xi^{3/2})^{-1}) \xi^{1/2} (1 + 0.253\xi^{3/2})^{1/3} \quad (3.4)$$

όπου  $F_0$  είναι ο αρχικός αριθμός Froude, που ορίζεται από τη σχέση:

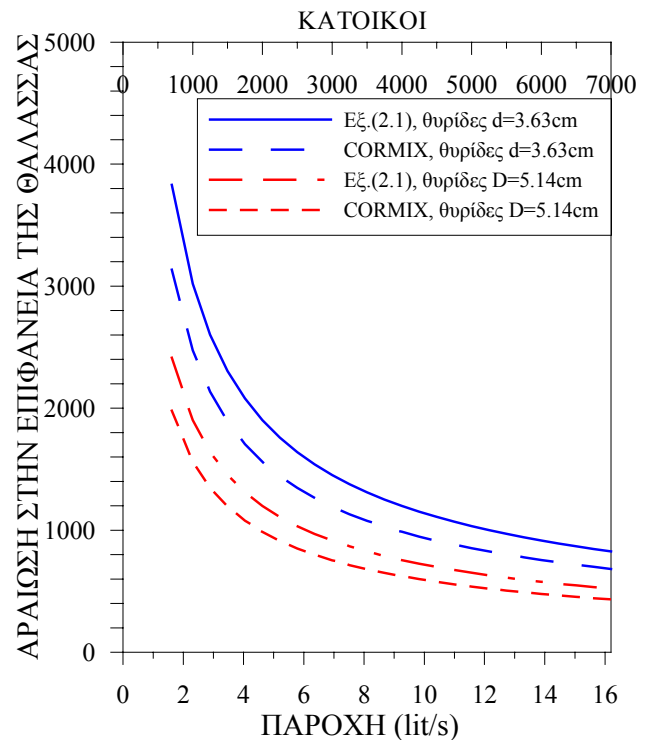
$$F_0 = \frac{U_o}{\sqrt{\frac{\rho_a - \rho_o}{\rho_o} gw}} \quad (3.5)$$

και  $\xi$  είναι αδιάστατη παράμετρος οριζόμενη ως εξής:

$$\xi = \left(\frac{x}{w}\right) F_0^{-4/3} \quad (3.6)$$

Η απόσταση μεταξύ των οπών εκροής σε ένα διαχυτήρα εκλέγεται από το μελετητή. Ως ελάχιστη απόσταση μεταξύ

των εκροών λαμβάνεται το 10πλάσιο της διαμέτρου της οπής, ώστε να μην επηρεάζει υδραυλικά η ροή της κάθε θυρίδας τη ροή των γειτονικών της θυρίδων. Η μέγιστη απόσταση των οπών διάθεσης προκύπτει από την ανάγκη επικάλυψης των κώνων ρύπανσης, ώστε να δημιουργείται διδιάστατη ροή. Η κατακόρυφη απόσταση από το σημείο διάθεσης, όπου αρχίζει η επικάλυψη, εξαρτάται από τη γωνία εξάπλωσης των μεμονωμένων αξισυμμετρικών ροών. Σύμφωνα με πειραματικές μετρήσεις [4] η εφαπτομένη της γωνίας εξάπλωσης (από τον κατακόρυφο άξονα) είναι 0.285 και συνεπώς οι μεμονωμένοι κώνοι των αξισυμμετρικών φλεβών αρχίζουν να επικαλύπτονται σε βάθος από το σημείο διάθεσης ίσο με την απόσταση μεταξύ των οπών διαιρεμένη με το  $2 \times 0.285 = 0.57$ . Από την εξ. (3.4) καθώς και από το έμπειρο σύστημα CORMIX μπορεί να προκύψει ότι για το ίδιο συνολικό εμβαδόν των θυρίδων διάθεσης της παροχής λυμάτων η αραιώση αυξάνεται αυξανόμενης της απόστασης μεταξύ των θυρίδων και συνεπώς του συνολικού μήκους του διαχυτήρα. Για το λόγο αυτό στην προτεινόμενη μέθοδο διάθεσης μέσω εύκαμπτων σωλήνων είναι προτιμότερο ο κάθε εύκαμπτος σωλήνας να απολήγει σε δύο οπές (ίσου συνολικού εμβαδού), ώστε το συνολικό μήκος του διαμορφούμενου διαχυτήρα να διπλασιάζεται και συνεπώς να αυξάνεται η αραιώση.



Σχήμα 2: Αραιώση στην επιφάνεια της θάλασσας βάθους 20 m αξισυμμετρικών φλεβών που δημιουργούνται από τις απολήξεις 6 εύκαμπτων σωλήνων.

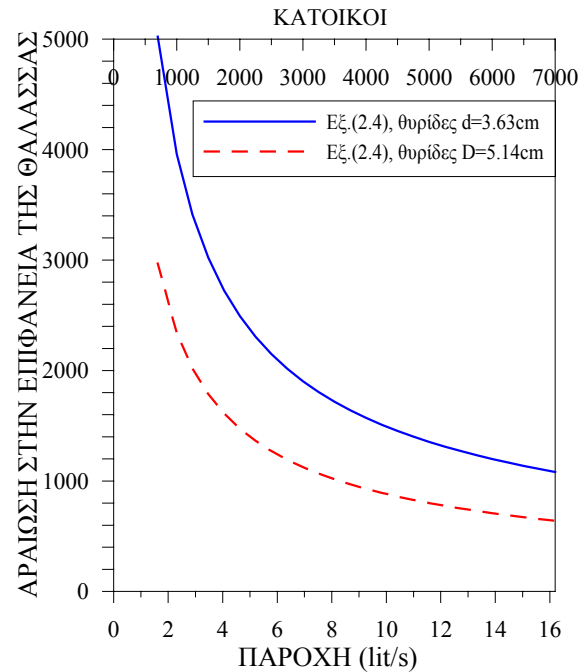
Figure 2: Dilution at the sea surface resulting from outfall discharging from 6 flexible pipes at a depth of 20 m.

Στο σχήμα 3 έχουν σχεδιαστεί οι αραιώσεις στην επιφάνεια της θάλασσας βάθους 20 m, ως συνάρτηση του πληθυσμού, για 6 εύκαμπτους σωλήνες, που διαμορφώνουν ένα διαχυτήρα με δύο τρόπους: α) με τις απολήξεις 6 εύκαμπτων σωλήνων διαμέτρου  $D=5.14$  cm τοποθετημένων σε αποστάσεις 4.25 m, και β) με 12 απολήξεις 6 εύκαμπτων σωλήνων διαμέτρου  $d=3.63$  cm τοποθετημένων επίσης σε αποστάσεις 4.25 m. Στην περίπτωση της διδιάστατης ροής τόσο η εξ. (3.4) όσο και το έμπειρο σύστημα CORMIX προβλέπουν ακριβώς τις ίδιες αραιώσεις. Όπως προκύπτει από το σχήμα 3, η αραιώση για οποιοδήποτε αριθμό κατοίκων και συνεπώς οποιαδήποτε παροχή λυμάτων είναι 1.7 φορές μεγαλύτερη, στην περίπτωση που ο διαχυτήρας διαμορφώνεται από 12 απολήξεις διαμέτρου  $d=3.63$  cm αντί 6 απολήξεων διαμέτρου  $D=5.14$  cm.

Θα πρέπει, επίσης, να προσδιοριστεί η μέγιστη δυνατή απόσταση των οπών διάθεσης, ώστε να επικαλύπτονται οι κώνοι ρύπανσης των αξισυμμετρικών ροών, να ισχύει η υπόθεση της διδιάστατης ροής και συνεπώς να επιτυγχάνεται η μέγιστη δυνατή αραιώση. Ο προσδιορισμός της μέγιστης αυτής απόστασης μεταξύ των οπών για τη μεγιστοποίηση της αραιώσης έγινε με τη χρήση του έμπειρου συστήματος CORMIX και βρέθηκε ότι για την περίπτωση διάθεσης λυμάτων σε βάθος θάλασσας 20 m και για διαμέτρους διάθεσης 3.63 cm είναι 4.25 m. Στην περίπτωση αυτή η επικάλυψη των αξισυμμετρικών ανωστικών φλεβών αρχίζει σε απόσταση από το σημείο διάθεσης  $4.25/0.57=7.5$  m.

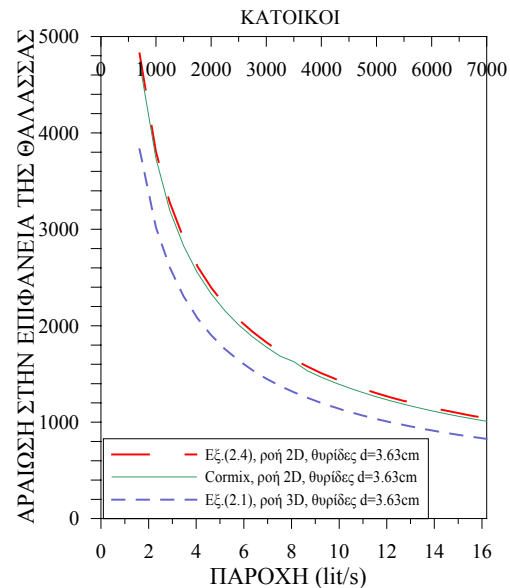
Στο σχήμα 4 έχουν σχεδιαστεί οι αραιώσεις στην επιφάνεια της θάλασσας βάθους 20 m, ως συνάρτηση του πληθυσμού, για 6 εύκαμπτους σωλήνες που διαμορφώνουν ένα διαχυτήρα με 12 απολήξεις διαμέτρου  $d=3.63$  cm. Όπως προκύπτει, στην περίπτωση που οι οπές απέχουν 4.0 m μεταξύ τους και συνεπώς η ροή είναι διδιάστατη, οι προβλεπόμενες αραιώσεις τόσο από την εξ. (3.4) όσο και από το έμπειρο σύστημα CORMIX συμπίπτουν. Στην περίπτωση που οι οπές απέχουν μεγαλύτερη απόσταση από 4.25 m, που είναι, όπως προαναφέρθηκε, η οριακή απόσταση για διδιάστατη ροή, τότε η αραιώση για τη δημιουργούμενη αξισυμμετρική τρισδιάστατη ροή, όπως προβλέπεται από τη σχ. (3.1) και σχεδιάζεται στο σχήμα 4, είναι μικρότερη σε σχέση με τη διδιάστατη, κατά 1.26 φορές για οποιοδήποτε αριθμό κατοίκων. Υπενθυμίζεται ότι το έμπειρο σύστημα CORMIX προβλέπει ακόμα μικρότερη αραιώση σε σχέση με τη σχ. (3.1) για την τρισδιάστατη ροή. Επίσης, από το σχήμα 4 προκύπτουν πολύ μεγάλες αραιώσεις από 1.000 έως 4.800 για πληθυσμούς από 7.000 έως 700 άτομα αντίστοιχα, που συνεπάγεται ότι ενδεχομένως να είναι δυνατή η διάθεση των λυμάτων μετά από πρωτοβάθμιο μόνο καθαρισμό, χωρίς την απαίτηση κατασκευής δευτεροβάθμιου (βιολογικού) καθαρισμού. Συμπερασματικά προκύπτει από τα παραπάνω ότι επιτυγχάνεται μεγαλύτερη αραιώση: α) όταν η ροή είναι διδιάστατη παρά αξισυμμετρική, β) όταν η απόσταση μεταξύ των θυρίδων διάθεσης είναι κατά το δυνατό μεγαλύτερη και μέχρι τα 4.25 m για το συγκεκριμένο βάθος των 20 m και γ) όταν ο κάθε εύκαμπτος σωλήνας διαμέτρου  $D=5.14$

cm απολήγει σε δύο θυρίδες ίσου συνολικού εμβαδού και διαμέτρου  $d=3.63$  cm.



Σχήμα 3: Αραιώση στην επιφάνεια της θάλασσας βάθους 20 m διδιάστατης ροής που δημιουργείται από τις απολήξεις 6 εύκαμπτων σωλήνων.

Figure 3: Dilution at the sea surface resulting from outfall discharging from 6 flexible pipes at a depth of 20 m.



Σχήμα 4: Αραιώση στην επιφάνεια της θάλασσας βάθους 20 m δημιουργούμενης ροής από τις απολήξεις 6 εύκαμπτων σωλήνων, που απολήγουν σε 1 ή 2 θυρίδες ο καθένας.

Figure 4: Dilution on the sea surface resulting from outfall discharging from 6 flexible pipes (6 or 12 round ports) at a depth of 20 m.

#### 4. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΥΠΟΒΡΥΧΙΟΥ ΑΓΩΓΟΥ - ΔΙΑΧΥΤΗΡΑ

Η διαδικασία σχεδιασμού ενός συστήματος υποβρύχιου αγωγού - διαχυτήρα είναι κατά βάση επαναληπτική και ο τελικός σχεδιασμός, που θα επιλεγεί, είναι συνήθως η κατάληξη πολλών δοκιμών. Για την αποφυγή κοπιωδών και χρονοβόρων επαναληπτικών δοκιμών παρουσιάζεται αλγόριθμος σχεδιασμού με τη βοήθεια δύο νομογραφημάτων, που περιγράφονται στη συνέχεια. Από το σχήμα 5 υπολογίζονται οι απώλειες ενέργειας στον εύκαμπτο σωλήνα διαμέτρου 5.14 cm, λόγω τριβών, ως συνάρτηση του αριθμού των κατοίκων ή της αντιστοιχούσας παροχής, υποθέτοντας κατανάλωση νερού 200 λίτρα ανά ημέρα και άτομο. Από το ίδιο σχήμα υπολογίζεται, επίσης, η ταχύτητα ροής με βάση τον αριθμό των κατοίκων ή την παροχή. Οι απώλειες ενέργειας  $h_f$  υπολογίστηκαν από την ευρέως γνωστή εξίσωση Darcy – Weisbach:

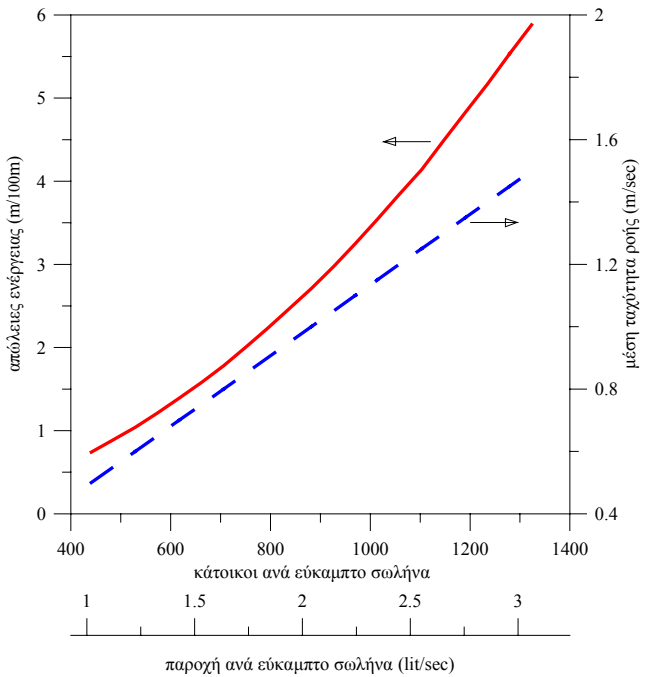
$$h_f = f \frac{L V^2}{D 2g} \tag{4.1}$$

όπου L είναι το μήκος του αγωγού, D είναι η διάμετρος, V είναι η μέση ταχύτητα ροής στον αγωγό και f είναι ο συντελεστής τριβής, που υπολογίστηκε από την ακόλουθη ρητή σχέση [5]:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2.0 \log\left(\frac{\epsilon/D}{3.7065} - \frac{5.0272}{Re} \log\left(\frac{\epsilon/D}{3.827} - \frac{4.567}{Re} \log\left(\left(\frac{\epsilon/D}{7.7918}\right)^{0.9924} + \left(\frac{5.3326}{208.815 + Re}\right)^{0.9345}\right)\right)\right) \tag{4.2}$$

όπου  $\epsilon$  είναι η τραχύτητα και Re είναι ο αριθμός Reynolds. Για τους εύκαμπτους αγωγούς από HDPE λήφθηκε φυσική τραχύτητα 0.1 mm.

Από το σχήμα 6 υπολογίζεται η αραιώση στην επιφάνεια της θάλασσας ως συνάρτηση του αριθμού των κατοίκων ή της παροχής για 2, 3, 4, 5 και 6 εύκαμπτους αγωγούς. Υποτίθεται ότι το βάθος διάθεσης είναι 20 m, η διαφορά πυκνότητας λυμάτων θάλασσας είναι 0.025 gr/cm<sup>3</sup> και κάθε εύκαμπτος σωλήνας διαμέτρου D=5.14 cm απολήγει σε δύο θυρίδες διαμέτρου d=3.63 cm. Επίσης, επειδή σύμφωνα με το έμπειρο σύστημα CORMIX το μήκος του διαχυτήρα πρέπει να είναι τουλάχιστον ίσο με το βάθος διάθεσης, οι καμπύλες, που δίνουν την αραιώση για 4, 5, και 6 σωλήνες, σχηματίζουν διδιάστατη ροή, καθώς ο καθένας απολήγει σε δύο θυρίδες, που απέχουν μεταξύ τους 4.0 m. Αντίθετα, οι 2 και 3 εύκαμπτοι σωλήνες, που απολήγουν ο καθένας σε 2 θυρίδες, δημιουργούν τρισδιάστατες αξισυμμετρικές ροές, καθώς οι θυρίδες απέχουν μεταξύ τους απόσταση μεγαλύτερη από 4.25 m. Οι υπολογισμοί της αραιώσης του σχήματος 6 έγιναν με τη χρήση της σχ. (3.4) για τη διδιάστατη ροή και της σχ. (3.1) για την αξισυμμετρική ροή.



Σχήμα 5: Απώλειες ενέργειας ανά 100 m εύκαμπτου σωλήνα και μέση ταχύτητα ροής ως συνάρτηση του αριθμού των κατοίκων ή της παροχής.

Figure 5: Energy loss per 100 m of flexible pipe and mean flow velocity as a function of population or discharge.

#### 4.1. Αλγόριθμος σχεδιασμού

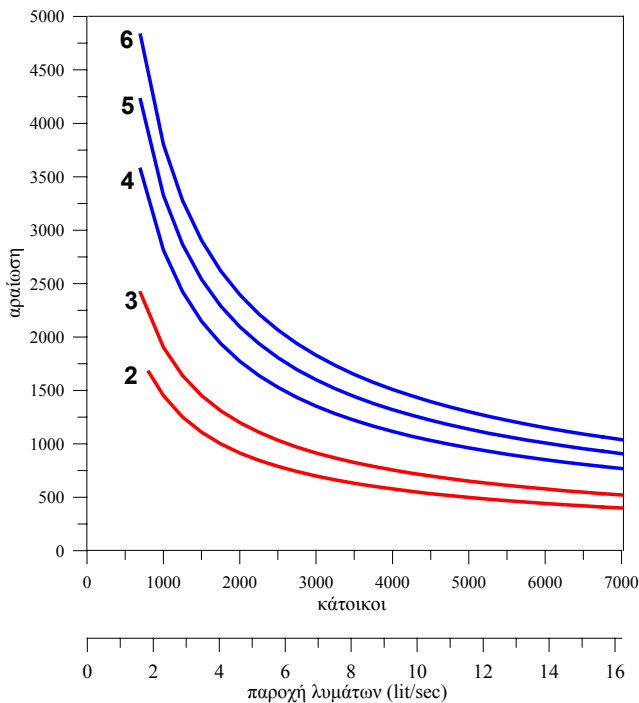
Η διαδικασία σχεδιασμού ενός συστήματος διάθεσης λυμάτων με τη χρήση εύκαμπτων αγωγών ακολουθεί τα εξής βήματα:

- Βήμα 1: Καθορίζεται η απόσταση διάθεσης από την ακτή και εκτιμάται το μήκος των εύκαμπτων σωλήνων.
- Βήμα 2: Με βάση το διαθέσιμο (ή παρεχόμενο με αντλίες) πιεζομετρικό ύψος υπολογίζεται το πιεζομετρικό διαθέσιμο ύψος για απώλειες τριβών ανά 100 m εύκαμπτου σωλήνα. Στο σχήμα 5 από τον αριστερό κατακόρυφο άξονα μετακινούμενοι οριζόντια και δεξιά μέχρι τη συνεχή γραμμή και στη συνέχεια κατακόρυφα προς τα κάτω προσδιορίζονται οι αντιστοιχούντες κάτοικοι ανά σωλήνα ή η παροχή ανά σωλήνα. Στο ίδιο νομογράφημα, με βάση τους κατοίκους ή την παροχή ανά σωλήνα, μετακινούμενοι κατακόρυφα προς τα πάνω μέχρι τη διακεκομμένη γραμμή και στη συνέχεια μετακινούμενοι οριζόντια και δεξιά υπολογίζεται η ταχύτητα ροής στον υποθαλάσσιο αγωγό.
- Βήμα 3: Διαιρώντας τον πληθυσμό του οικισμού με τους αντιστοιχούντες κατοίκους ανά εύκαμπτο αγωγό υπολογίζεται ο απαιτούμενος αριθμός των εύκαμπτων σωλήνων, ο οποίος στρογγυλοποιείται στον αμέσως μεγαλύτερο ακέραιο.

- Βήμα 4: Με βάση τον επιλεγέντα αριθμό των εύκαμπτων σωλήνων υπολογίζονται οι αντιστοιχούντες κάτοικοι ανά αγωγό και από το σχήμα 5 επαναπροσδιορίζονται τα μεγέθη ροής, δηλαδή οι απώλειες ενέργειας και η ταχύτητα ροής.
- Βήμα 5: Από το σχήμα 6 με δεδομένα τον πληθυσμό και τον αριθμό των εύκαμπτων σωλήνων υπολογίζεται η αραιώση των λυμάτων, που θα προκύψει από το συγκεκριμένο σχεδιασμό.
- Βήμα 6: Αν δεν είναι ικανοποιητική η επιτυγχάνομενη αραιώση ή αν το διαθέσιμο πιεζομετρικό φορτίο δεν επαρκεί για την κάλυψη των απωλειών ενέργειας, αυξάνεται ο αριθμός των εύκαμπτων σωλήνων και επαναλαμβάνεται η διαδικασία από το βήμα 4.

#### 4.2. Παράδειγμα εφαρμογής

Έστω ότι η διάθεση των λυμάτων μιας κωμόπολης 3.500 κατοίκων γίνεται σε βάθος θάλασσας 20 m με εύκαμπτους σωλήνες Φ63 από HDPE μήκους 500 m. Αν το διαθέσιμο πιεζομετρικό ύψος είναι 9 m, να επιλεγεί ο αριθμός των εύκαμπτων σωλήνων, να υπολογισθούν οι απώλειες ενέργειας, η μέση ταχύτητα ροής και η επιτυγχάνομενη αραιώση.



Σχήμα 6: Αραιώση στην επιφάνεια της θάλασσας βάθους 20 m ως συνάρτηση του αριθμού των κατοίκων ή της παροχής, για 2 έως 6 εύκαμπτους σωλήνες, που ο καθένας απολήγει σε δύο θυρίδες διαμέτρου  $d=3.63$  cm

Figure 6: Dilution at the sea surface as a function of population, resulting from outfall discharging from 2 to 6 flexible pipes (4 to 12 round ports of diameter  $d=3.63$  cm), at a depth of 20 m.

Σύμφωνα με το βήμα 2, για απώλειες ενέργειας  $h_f = 9 * (100/500) = 1.8$  m/100m προκύπτει από το σχήμα 5 αριθμός κατοίκων 709, που αντιστοιχούν σε κάθε εύκαμπτο σωλήνα, παροχή 1.64 lit/sec και μέση ταχύτητα ροής 0.80 m/sec. Από το βήμα 3 προκύπτει απαιτούμενος αριθμός εύκαμπτων σωλήνων =  $3.500 / 709=4.93$ , δηλαδή 5 εύκαμπτοι σωλήνες. Άρα (βήμα 4) ανά εύκαμπτο σωλήνα αντιστοιχούν  $3.500 / 5=700$  κάτοικοι, παροχή  $700 * 200 / (24*60*60) = 1.62$  lit/sec και από το σχήμα 5 η ταχύτητα λειτουργίας είναι  $V=0.79$  m/sec και οι απώλειες ενέργειας ανά 100m  $h_f=1.76$ m/sec. Συνεπώς για όλο το μήκος του εύκαμπτου σωλήνα οι συνολικές απώλειες είναι  $1.76*(500/100)=8.8$ m < 9m (διαθέσιμο)

Με βάση το συνολικό πληθυσμό (3.500) και τους 5 επιλεγέντες εύκαμπτους σωλήνες από το σχήμα 6, όπως αναφέρεται στο βήμα 5, προκύπτει αραιώση 1.440. Η αραιώση αυτή ισχύει για απόληξη του κάθε εύκαμπτου σωλήνα σε δύο θυρίδες διαμέτρου 3.63 cm, που τοποθετούνται σε αποστάσεις 4.0 m μεταξύ τους.

#### 5. ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΚΛΑΣΙΚΗΣ ΚΑΙ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ

Για να καταστεί δυνατή η συγκριτική αξιολόγηση, από τεχνικής και οικονομικής άποψης, της προτεινόμενης νέας μεθόδου σε σχέση με την κλασική λύση κατασκευής υποβρύχιου αγωγού – διαχυτήρα, μελετήθηκε τεχνικά σε επίπεδο προμελέτης ένα υποθετικό πρόβλημα διάθεσης υγρών λυμάτων μιας κωμόπολης και με τις δύο μεθόδους. Για το λόγο αυτό υποτέθηκε ότι τα λύματα μιας παραθαλάσσιας κωμόπολης 3.500 κατοίκων διατίθενται στην παρακείμενη θάλασσα σε βάθος 20 m, με μήκος υποθαλάσσιου αγωγού 500 m. Υποτέθηκε ταχύτητα θαλάσσιου ρεύματος 0.2 m/s, κυματισμός με ύψος κύματος στα βαθιά 3.55 m και περίοδο 8 sec. Τα τελευταία αυτά δεδομένα απαιτούνται για τον υπολογισμό των ασκούμενων δυνάμεων στον αγωγό αλλά και για την εκτίμηση της ζώνης θραύσης των κυμάτων και δεν λαμβάνονται υπόψη στον υπολογισμό της αραιώσης. Το έδαφος στον πυθμένα λήφθηκε μαλακό.

Για την κατασκευή σύμφωνα με την κλασική μέθοδο επιλέχθηκε αγωγός Φ200 από HDPE με πάχος τοιχώματος 18.2 mm της εταιρίας ΠΙΕΤΖΕΤΑΚΙΣ, για πίεση λειτουργίας 12.5 atm, που διατίθεται σε τμήματα των 12 m. Υποτέθηκε διαμόρφωση τμημάτων μήκους 60 m (modulus) με θερμοσυγκόλληση. Με βάση τις ασκούμενες δυνάμεις [6] ίδιου βάρους, άνωσης, ώθησης, αδράνειας, υδροστατικής άνωσης και τριβής υπολογίσθηκε η κατάλληλη ερμάτωση του αγωγού. Λόγω του μικρού βάθους θάλασσας και για την προστασία τόσο από τη δράση των κυματισμών όσο και από την ανθρώπινη παράκτια δραστηριότητα ο αγωγός τοποθετήθηκε σε όλο το μήκος του μέσα σε σκάμμα πάνω σε αμμώδες υπόστρωμα και με κατάλληλη επίχωση. Η κα-

θέλκυση των τεμαχίων των 60 m έγινε από ειδικά κατασκευασμένη ράμπα από βαγόνια σε σιδηροτροχιές, αφού πρώτα τοποθετούνταν τα έρματα αλλά και πλωτήρες και αερόσακοι με ικανή ανωστική δύναμη, ώστε ο αγωγός να επιπλέει και ταυτόχρονα να μη δημιουργούνται σημαντικές καμπτικές καταπονήσεις. Στη συνέχεια, με ρυθμιζόμενη ταυτόχρονη απαέρωση των αερόσακων ποντιζόταν το τμήμα του αγωγού και συνδεόταν με το προηγούμενο από δύτες με φλάντζες στο βυθό. Ακολουθούσε η επίχωση, που γινόταν προσεκτικά με πλωτό γερανό, ενώ τα υλικά της επίχωσης μεταφέρονταν με φορτηγίδα.

Για την κατασκευή σύμφωνα με την προτεινόμενη μέθοδο των εύκαμπτων σωλήνων επιλέχθηκε αγωγός Φ63 από HDPE με πάχος τοιχώματος 5.8 mm της εταιρίας ΠΕΤΖΕΤΑΚΙΣ, για πίεση λειτουργίας 12.5 atm, που διατίθεται σε ρολούς των 100 m. Στο χώρο του εργοταξίου δημιουργήθηκαν 10 τμήματα μήκους 200 m (modulus) με συγκόλληση «εν θερμώ» ανά δύο ρολών. Με βάση τις ασκούμενες δυνάμεις υπολογίστηκε, όπως και προηγουμένως, η κατάλληλη ερμάτωση του αγωγού. Λόγω της ευκαμψίας των αγωγών επιλέχθηκε η τοποθέτησή τους σε όρυγμα μόνο μέσα στη ζώνη θραύσης των κυμάτων (σε μήκος 110 m και μέχρι βάθος  $d_b=4,4m$ ), πάνω σε αμμώδες υπόστρωμα και με κατάλληλη επίχωση. Επιλέχθηκε η διάταξη αυτή σε αντίθεση με την κλασική μέθοδο του άκαμπτου αγωγού που τοποθετήθηκε σε ολόκληρο το μήκος του εντός σκάμματος - γιατί οι εύκαμπτοι σωλήνες δεν είναι το ίδιο ευπαθείς σε κρούσεις αιχμηρών αντικειμένων κατά την τοποθέτηση (εργαλεία, λιθορριπή προστασίας) αλλά και κατά τη λειτουργία (άγκυρες πλοίων) σε σχέση με τους άκαμπτους αγωγούς μεγαλύτερης διαμέτρου. Ακόμα, όμως και σε περίπτωση αστοχίας θα είναι σαφώς πιο εύκολη η αντικατάσταση ενός εύκαμπτου σωλήνα σε αντίθεση με την κλασική λύση, αφού ακόμα και η διάθεση των λυμάτων με μια ρύθμιση στο φρεάτιο φόρτισης θα μπορεί να συνεχιστεί με τη λειτουργία των υπόλοιπων σωλήνων. Έτσι, στην προτεινόμενη μέθοδο το κόστος εκσκαφών και επιχώσεων θα είναι σημαντικά μειωμένο, όπως θα φανεί και στη συνέχεια στη σύγκριση των προϋπολογισμών. Η καθέλκυση και πόντιση κάθε 5άδας τεμαχίων των 200 m γίνονταν με παρόμοιο τρόπο, όπως και προηγουμένως, αλλά με μεγαλύτερη ευκολία, καθώς λόγω της ευκαμψίας των αγωγών δεν υπήρχε κίνδυνος αστοχίας σε περίπτωση μη ταυτόχρονης πόντισης. Για το λόγο αυτόν το κόστος της εργασίας αυτής είναι πολύ μικρότερο συγκριτικά με το αντίστοιχο της κλασικής μεθόδου. Ο τρόπος επίχωσης δεν διέφερε από την κλασική μέθοδο.

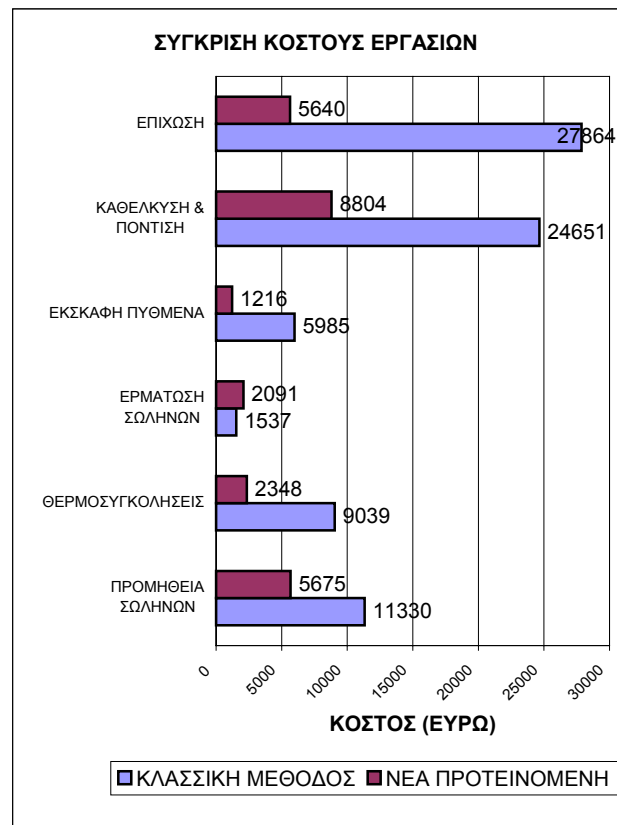
Συμπερασματικά τα πλεονεκτήματα της προτεινόμενης νέας μεθόδου σε σχέση με την κλασική λύση είναι:

- η μη απαίτηση ύπαρξης μεγάλου χώρου εργοταξίου,
- η ταχύτητα και η ευκολία συναρμολόγησης,
- η μεγάλη ευκολία πόντισης των εύκαμπτων αγωγών με λιγότερο εξοπλισμό και χωρίς κινδύνους αστοχίας και
- οι μικρότερες απαιτήσεις εξασφάλισης στον πυθμένα της θάλασσας από μηχανικές καταπονήσεις.

Για τη σύγκριση των δύο μεθόδων από οικονομικής πλευράς έγιναν οι προϋπολογισμοί, οι οποίοι περιέλαβαν τις εργασίες, που φαίνονται στο σχήμα 7.

Δεν περιελήφθησαν η κατασκευή του φρεατίου φόρτισης, έξοδα διαμόρφωσης εργοταξιακού χώρου, γενικά και επισφαλής έξοδα, το όφελος του εργολάβου και ο φόρος προστιθέμενης αξίας. Για την προμήθεια των σωλήνων χρησιμοποιήθηκε ο τιμοκατάλογος Ιανουαρίου 2003 της εταιρίας ΠΕΤΖΕΤΑΚΙΣ.

Οι τιμές θερμοσυγκόλλησης, καθέλκυσης και πόντισης λήφθηκαν από πρόσφατη μελέτη (έτους 2000) ανάλυσης τιμών της Δ.Ε.Υ.Α. Πρέβεζας και για τα υπόλοιπα υλικά και εργασίες λήφθηκαν τιμές από τα Αναλυτικά Τιμολόγια Λιμενικών Έργων (Α.Τ.Λ.Ε.) 1<sup>ου</sup> τριμήνου 2003. Με βάση τα παραπάνω προέκυψε συνολικό κόστος 25.774 ευρώ για την προτεινόμενη νέα μέθοδο των εύκαμπτων σωλήνων έναντι 80.406 ευρώ της κλασικής μεθόδου, δηλαδή σχέση 1:3. Βεβαίως το τελευταίο ποσοτικό αποτέλεσμα δεν ισχύει γενικώς, καθώς βασίζεται σε συγκεκριμένο βάθος θάλασσας, συγκεκριμένες διαμέτρους αγωγών και ένα λογικό εύρος παροχών. Όμως είναι ενδεικτικό της σχετικής τάξης μεγεθών των συγκρινόμενων μεθόδων.



Σχήμα 7: Σύγκριση κόστους ανά είδος δαπάνης κλασικής και νέας προτεινόμενης μεθόδου.

Figure 7: Cost comparison for various activities of both classical and new proposed methods.

## 6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία διερευνήθηκε μια νέα πρόταση διάθεσης υγρών λυμάτων για μικρούς οικισμούς με τη χρήση εύκαμπτων σωλήνων. Εξετάστηκαν διάφορες γεωμετρικές διάθεσης με τη χρήση τόσο αναλυτικών τύπων όσο και του έμπειρου συστήματος CORMIX, και προσδιορίστηκε η βέλτιστη ως προς την αραιώση διάταξη διαχυτήρα. Για την αποφυγή κοπιωδών και χρονοβόρων επαναληπτικών δοκιμών παρουσιάστηκε αλγόριθμος σχεδιασμού με τη βοήθεια κατάλληλων νομογραφημάτων. Τέλος, συγκρίθηκαν οι δύο λύσεις ως προς το τεχνικό και οικονομικό τους μέρος και βρέθηκε ότι η προτεινόμενη μέθοδος διάθεσης με εύκαμπτους σωλήνες βρίσκεται από πλευράς κόστους στο 1/3 του κόστους κατασκευής ενός κλασικού συστήματος υποβρύχιου αγωγού – διαχυτήρα για την επίτευξη της ίδιας αραιώσης. Παρά το γεγονός ότι η παραπάνω οικονομική σύγκριση δεν ισχύει γενικώς, καθώς βασίστηκε σε συγκεκριμένο βάθος θάλασσας, συγκεκριμένες διαμέτρους αγωγών

και ένα λογικό εύρος παροχών, όμως είναι ενδεικτική της σχετικής τάξης μεγεθών των συγκρινόμενων μεθόδων.

## 7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Kotsovinos, N. E., "Dilution in a Vertical Round Buoyant Jet", (1978), **Journal of Hydraulics**, ASCE, pp. 795-798.
2. Jirka, G., Doneker, R., Hinton, W., **User's Manual for CORMIX**, (1996), EPA, Washington DC.
3. Kotsovinos, N. E., "Waste Disposal from a two-dimensional Diffuser", (1978), **Journal of Hydraulics**, ASCE, pp. 559-581.
4. Kotsovinos, N. E., List, E. J., "Plane Turbulent Buoyant Jets. Part 1. Integral Properties", (1977), **J. Fluid Mechanics**, Vol. **81**, pp. 25-44.
5. Romeo, E., Royo, C., Monzon, A., "Improved Explicit Equations for Estimation of the Friction Factor in Rough and Smooth Pipes", (2002), **Chemical Engineering Journal**, vol. **86**, pp. 369-374.
6. Δασκαλάκης, Μ. Κ., **Υποθαλάσσιοι Σωληναγωγοί – Θεωρητικός Υπολογισμός – Συστήματα Εγκατάστασης**, (1997), Αθήνα.

---

**Π. Β. Αγγελίδης**

Λέκτορας, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Δ.Π.Θ., Β. Σοφίας 12, Ξάνθη 671 00.

**Π. Θ. Βάντζου**

M.Sc. Πολιτικός Μηχανικός, Οδηγητριάς 6, Άρτα 471 00.



Extended summary

# Wastewater Disposal Using Flexible Pipes

**P. B. ANGELIDIS**

Lecturer D.U.TH.

**P. Th. BANTZOY**

M.Sc. Civil Engineer

## Abstract

*In this paper we propose a new economical way to discharge wastewater into the open sea using flexible pipes. For small communities (up to 7.000 habitants), instead of using a submarine pipe and a diffuser of a typical diameter 30 cm, we suggest using a number of flexible pipes made from polyethene HDPE with smaller diameter (e.g. 6cm), which terminate sequentially at typical distances of 4m forming a diffuser. The cost of this type of pipes is small and the process of assembling and constructing is more convenient compared with the regular solution. We also present a methodology for choosing the number of pipes which form the diffuser as a function of the population, the depth of discharge and the desirable dilution.*

f: friction loss coefficient  
 $F_{0i}$ : initial densimetric Froude number  
 g: acceleration due to gravity  
 $h_f$ : energy friction loss  
 Re: Reynolds number  
 L: submarine pipe length  
 $s_m$ : dilution along the jet axis  
 $U_0$ : initial wastewater discharge velocity  
 V: mean flow velocity in the submarine pipe  
 w: equivalent slot width for 2D flow  
 x: vertical distance from discharge point

## 1. INTRODUCTION

To release wastewater from a coastal city we usually select submarine pipe made from polyethylene HDPE, for an operational pressure of at least 10 atm. This material is suitable for most cases in Greece for submarine pipe diameters up to 1 m. In this paper we propose a new economical way to discharge wastewater into the open sea using flexible pipes made from the same material. Instead of using a submarine pipe and a diffuser of a typical diameter 30 cm, we suggest using a number of flexible pipes made from polyethene HDPE with smaller diameter (e.g. 6 cm), which terminate sequentially, at typical distances of 4 m, forming a diffuser. We present a methodology for choosing the number of pipes which form the diffuser as a function of the population and the desirable dilution.

## 2. SYMBOLS

$\epsilon$ : pipe roughness  
 $\xi$ : non dimensional parameter  
 $\rho_a$ : ambient density  
 $\rho_0$ : initial wastewater density  
 d: diameter of diffuser's round ports  
 D: diameter of flexible pipe

Submitted: Apr. 26, 2003 Accepted: Jan. 4, 2005

## 3. FORMING DIFFUSER USING FLEXIBLE PIPES

Instead of using only one submarine pipe and one diffuser of a typical diameter  $\Phi 300$  (figure 1b), we propose using a few flexible pipes (figure 1a) made from the same material (HDPE) with smaller diameter  $\Phi 63$ , which terminate sequentially on a straight line and transport the same wastewater discharge. The optimal geometry of the proposed type of the diffuser is investigated. Absence of current and a sea without stratification will be assumed. The following two outflow geometries are examined: a) vertical axisymmetric buoyant jet flow, and b) vertical two-dimensional buoyant jet flow. For both geometries we present a methodology for the optimum design (choice of number of pipes, number of ports, optimum dilution, cost of construction).

### 3.1. Axisymmetric flow

The centerline dilution of a vertical axisymmetric flow depends on the round port discharge diameter and the initial flow velocity. We study the dilution from multiple small diameter submarine pipes for two port configurations: a) each flexible pipe  $\Phi 63$  discharges through a round port of internal diameter  $D=6.3 \cdot 2 \cdot 0.58=5.14$  cm, and b) each flexible pipe  $\Phi 63$  releases wastewater from two ports with

same total area and a diameter  $d=3.63$  cm. We assume a water consumption of 200 litres per inhabitant per day and a depth of disposal of 20 m. With these data and using the CORMIX expert system [2] and an analytic equation (2.1), the diagram of figure 2 is drawn, for six flexible pipes. It is observed that using six small HDPE pipes of outer diameter 63 mm (inner diameter 51.4 mm) with two ports of diameter  $d=3.63$  cm at their end, we obtain very high dilution (about 3.000 for 1.000 inhabitants).

### 3.2. Two-dimensional flow

From the analytic equation (2.4), and from the CORMIX expert system, we observe that the centerline dilution increases with the distance between disposal ports, keeping the total discharge area constant. For this reason, in the proposed method of disposal via flexible pipes, it is preferable that each flexible pipe eject wastewater through two ports instead of one, in order to double the total diffuser length and consequently to increase the dilution. In figure 3, the dilution at the surface of sea of depth of 20 m has been drawn as a function of population, for six flexible pipes which discharge through 6 ports with diameter  $D=5.14$  cm, or through 12 ports with diameter  $d=3.63$  cm, placed at distances of 4.25 m. As we see, the dilution increases by 1.7 times when the disposal from each flexible pipe is via two ports of diameter  $d=3.63$  cm as opposed to one port of diameter  $D=5.14$  cm.

The maximum distance between the ports that allows a two-dimensional flow to be formed (to maximize dilution) can be determined with the CORMIX expert system. This distance was found to be 4.25 m for the study case. In figure 4, the dilution at the surface of sea of depth of 20 m has been drawn as a function of population, for 6 flexible pipes, which discharge through 12 ports with diameter  $d=3.63$  cm, placed at distances of 4 m (two-dimensional flow) or at distances  $>4.25$  m (axisymmetric flow). It is observed that using six small HDPE pipes of outer diameter 63 mm (inner diameter 51.4 mm) with two ports of diameter  $d=3.63$  cm at their end, we obtain very high dilution (about 4.000 for 1.000 inhabitants).

## 4. DESIGN METHODOLOGY

### 4.1. Design algorithm

Step 1: Determine the length of the flexible pipes based on

**P. B. Angelidis**

Lecturer, Dept. of Civil Engineering, D.U.TH., V. Sofias 12, Xanthi 671 00.

**P. Th. Bantzou**

M.Sc. Civil Engineer, Odigitrias 6, Arta 471 00.

the desired distance from the shore.

Step 2: From figure 5, and for the available energy for friction loss, specify the inhabitants per flexible pipe.

Step 3: Divide the total population by the inhabitants per flexible pipe to compute the necessary number of flexible pipes.

Step 4: Compute energy loss and flow velocity from figure 5, as a function of inhabitants per flexible pipe.

Step 5: Compute the dilution from figure 6, as a function of population and the selected number of flexible pipes.

Step 6: If the dilution is not satisfactory, or if the energy loss is greater than the available energy, then increase the number of flexible pipes and return to step 4 to repeat the process.

### 4.2. Application

In order to illustrate the design procedure, we present an example of a wastewater disposal system design for a small community of 3.500 habitants, using flexible pipes.

## 5. ECONOMIC COMPARISON

In order to compare from technical and economical aspect the proposed new method of wastewater disposal using flexible pipes with the classic solution of submarine pipe and diffuser, a hypothetical problem was studied using the two methods. We found (figure 7) that the total cost for the proposed new method is 25.774 euros, compared with 80.406 euros for the classical method, that is to say a ratio of 1:3. Other advantages of the proposed new method concerning the classical method are: a) smaller area for worksite, b) very quick and easy assembly, c) very quick and easy way to sink the flexible pipes without danger of failure, d) smaller fastening requirements.

## 6. CONCLUSIONS

In this paper we propose a new economic way to discharge wastewater to open sea, using flexible pipes, which is suitable for small communities. We present the design methodology, and we compare the proposed new method with the traditional method from technical and economical aspect.