

Διάθεση Αστικών Υγρών Αποβλήτων από Μικρούς Παραθαλάσσιους Οικισμούς

N. E. ΚΩΤΣΟΒΙΝΟΣ

Καθηγητής Δ.Π.Θ.

Π. Β. ΑΓΓΕΛΙΔΗΣ

Δρ Πολιτικός Μηχανικός

Περίληψη

Στην εργασία αυτή μελετάται η μεταφορά και η διάθεση των υγρών αποβλήτων από το φρεάτιο εξόδου των εγκαταστάσεων καθαρισμού λυμάτων στον θαλάσσιο αποδέκτη με τη χρησιμοποίηση υποβρύχιου αγωγού και διαχυτήρα. Συγκεκριμένα μελετώνται τα τεχνικά χαρακτηριστικά και η διαστασιολόγηση του υποβρύχιου αγωγού και του διαχυτήρα και προτείνεται μια μεθοδολογία για τον υπολογισμό της αραίωσης των λυμάτων. Παρουσιάζονται διαγράμματα για την κατάλληλη επιλογή του αριθμού των οπών και του μήκους του διαχυτήρα με βάση τον ενδεικτικό πληθυσμό, το διατιθέμενο βάθος και την επιθυμητή αραίωση. Παρουσιάζονται, επίσης, διαγράμματα υπολογισμού της αραίωσης για υποβρύχιο αγωγό χωρίς διαχυτήρα και αποδεικνύεται ότι η κατασκευή διαχυτήρα είναι απαραίτητη για πληθυσμό μεγαλύτερο της τάξεως των 2,000 κατοίκων. Ακόμη για μικρούς πληθυσμούς υποδεικνύεται η διαμόρφωση κατάλληλου διαχυτήρα με στόχο την επίτευξη αραίωσης μεγαλύτερης του 1,000, ώστε να μειωθεί ή να εξαιρεθεί η απαίτηση για χλωρίωση των λυμάτων πριν από τη διάθεσή τους στη θάλασσα.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα υγρά απόβλητα των παραθαλάσσιων πόλεων, κοινοτήτων ή ξενοδοχειακών εγκαταστάσεων, που μεταφέρουν ένα ευρύ φάσμα ρύπων, διατίθενται μετά από κάποιου βαθμού καθαρισμό στη θάλασσα. Ο μελετητής μηχανικός καλείται να επιλέξει τον καταλληλότερο σχεδιασμό για την επίτευξη του αντικειμενικού σκοπού, που είναι η ικανοποιητική ανάμιξη των λυμάτων με τον υδάτινο αποδέκτη έτσι, ώστε οι υγειονομικές προδιαγραφές να μη παραβιάζονται. Ο πρωταρχικός σκοπός ενός συστήματος διάθεσης υγρών λυμάτων είναι η επίτευξη ταχείας αρχικής ανάμιξης λυμάτων και περιβάλλοντος ρευστού στην «κοντινή» περιοχή. Στην πραγματικότητα μόνο η αρχική ανάμιξη στην «κοντινή» περιοχή βρίσκεται κάτω από τον έλεγχο του μηχανικού, αφού η τυρβώδης διάχυση και διασπορά, που ακολουθούν, εξαρτώνται πρωταρχικά από τη ροή στο περιβάλλον ρευστό και ως εκ τούτου ελέγχεται από τη φύση.

Η επιτυγχάνομενη αραίωση από ένα σύστημα διάθεσης υγρών αποβλήτων εξαρτάται από την παροχή των λυμάτων, το μήκος του διαχυτήρα, τη διάμετρο των οπών, τη μεταξύ τους απόσταση, το βάθος διάθεσης καθώς και από την ύπαρξη ρευμάτων και στρωμάτωσης πυκνότητας, που οφείλεται συνήθως στη μεταβολή της θερμοκρασίας με το βάθος. Ανάμεσα σε αυτά μόνο το μήκος του διαχυτήρα, η διάμετρος των οπών, η μεταξύ τους απόσταση καθώς και το

βάθος διάθεσης βρίσκονται κάτω από τον έλεγχο του μηχανικού και πρέπει να προσδιοριστούν από τη διαδικασία σχεδιασμού. Στην παρούσα εργασία εξετάζεται η δυσμενέστερη περίπτωση από υγειονομικής πλευράς, που είναι η θεώρηση της θάλασσας χωρίς στρωμάτωση (ομογενές περιβάλλον), οπότε τα επεξεργασμένα λύματα φθάνουν στην επιφάνεια της θάλασσας. Επιπλέον υποτίθεται πλήρης απουσία ρευμάτων.

Οι τυρβώδεις ανωστικές φλέβες, αξισυμμετρικές ή διδιάστατες, εκτοξευόμενες κατακόρυφα, οριζόντια ή υπό κλίση, δημιουργούνται από την αρχική ορμή στην έξοδο και με τη σύγχρονη δράση των ανωστικών δυνάμεων οδηγούνται προς τα πάνω. Οι διάφορες κατηγορίες των ροών αυτών έχουν μελετηθεί άλλες περισσότερο και άλλες λιγότερο τόσο πειραματικά όσο και θεωρητικά με στόχο την κατανόηση του μηχανισμού της ανάμιξης και της δομής των ροών αυτών καθώς και τη μαθηματική τους προσομοίωση. Οι κατακόρυφες εκτοξευόμενες αξισυμμετρικές και διδιάστατες ανωστικές φλέβες έχουν μελετηθεί σε μεγάλο βάθος τα τελευταία χρόνια, βλέπε για παράδειγμα List [1, 2], Kotsovinos [3], Kotsovinos [4], Papanicolaou and List [5], κ.λπ. Λιγότερο έχουν μελετηθεί οι οριζοντίως ή υπό γωνία εκτοξευόμενες ανωστικές φλέβες, βλέπε Lemieux [6], Abdel-Rahman [7], Αγγελίδης [8], Papps and Wood [9].

Στόχος της παρούσας εργασίας είναι: α) να παρουσιάσει μια μεθοδολογία για τον ορθό και ακριβή υπολογισμό της αραίωσης, που να βασίζεται σε σύγχρονες θεωρίες μίξης ρευστών με διαφορετική πυκνότητα, και β) επειδή η διαδικασία σχεδιασμού διαχυτήρων είναι κατά βάση επαναληπτική και ο τελικός σχεδιασμός που θα επιλεγεί είναι συνήθως η κατάληξη πολλών δοκιμών, να παρουσιάσει διαγράμματα για την απευθείας επιλογή διαχυτήρα χωρίς επαναληπτικές δοκιμές.

ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΙ

ζ	αδιάστατη παράμετρος
ρ_a	πυκνότητα υγρού αποδέκτη
ρ_0	αρχική πυκνότητα λυμάτων στην εκροή
b	πλάτος ισοδύναμης σχισμής διδιάστατης ανωστικής φλέβας

c_m	συγκέντρωση ρύπου στον άξονα της ροής στην εξεταζόμενη θέση
c_0	συγκέντρωση ρύπου στην εκροή
d	διάμετρος θυρίδων (οπών) διαχυτήρα
D	διάμετρος οπής για διάθεση χωρίς διαχυτήρα
F_0	αρχικός πυκνομετρικός αριθμός Froude
g	επιτάχυνση της βαρύτητας
L	μήκος διαχυτήρα
s	μήκος καμπύλης τροχιάς του άξονα της ροής
s_m	ελάχιστη αραίωση στον άξονα της τυρβώδους ανωστικής φλέβας
u_0	αρχική ταχύτητα λυμάτων στην εκροή
x	κατακόρυφη απόσταση από το σημείο διάθεσης λυμάτων

2. ΣΧΕΔΙΑΣΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΑΓΩΓΩΝ

Η επιλογή της διαμέτρου του υποβρύχιου αγωγού οφείλει να γίνεται (όπου είναι δυνατό) με τρόπο που το διαθέσιμο πιεζομετρικό ύψος του φρεατίου αναρύθμισης να επαρκεί για την υδραυλική λειτουργία του συστήματος υποβρύχιου αγωγού - διαχυτήρα, χωρίς πρόσθετες δαπάνες εγκατάστασης αντλιοστασίου για το έτος στόχο, που οφείλει κατά την άποψή μας να είναι η 40ετία. Η 40ετία προκύπτει κατ' αναλογία των έργων πολιτικού μηχανικού στη είσοδο εγκαταστάσεων καθαρισμού των λυμάτων, που σχεδιάζονται για την προαναφερθείσα χρονική περίοδο.

Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό, που καλείται να επιλέξει ο μελετητής, είναι το μήκος του υποθαλάσσιου αγωγού. Είναι προφανές ότι το μήκος αυτό είναι συνάρτηση της παροχής εκροής των επεξεργασμένων λυμάτων, της γεωγραφικής διαμόρφωσης, της εκτίμησης της ανανέωσης των νερών της θαλάσσιας περιοχής, της τοπογραφίας πυθμένα, της τουριστικής σπουδαιότητας και άλλων σχετικών παραμέτρων. Το μήκος του υποβρύχιου αγωγού πρέπει κατά την άποψή μας να επιλέγεται μεγαλύτερο από τα 500 μέτρα με βέλτιστη τιμή της τάξεως των 750 έως 1000 μέτρων από την ακτή, ενώ το βάθος εκροής, δηλαδή το βάθος τοποθέτησης του διαχυτήρα, πρέπει να είναι τουλάχιστον 20 μέτρα. Οι παραπάνω τιμές προκύπτουν από την ανάγκη επίτευξης ικανοποιητικής αραίωσης στην ακτή με τους μηχανισμούς της δυναμικής μίξης στην «κοντινή περιοχή», της οριζόντιας εξάπλωσης και της παθητικής διάχυσης. Ο ρυθμός που κυρίως έχουμε κατά νου, είναι ο αριθμός κολοβακτηριοειδών των αστικών λυμάτων, που θα πρέπει με βάση τον κανονισμό να βρίσκεται κάτω από συγκεκριμένη τιμή στην ακτή, που χρησιμοποιείται για κολύμβηση. Το ικανοποιητικό βάθος διάθεσης είναι απαραίτητο για την προστασία του διαχυτήρα από το στερεοφορτίο κοντά στον πυθμένα, που συνοδεύει μια μεγάλη θαλασσοταραχή. Επί πλέον η απόσταση και το βάθος αυτό είναι αναγκαία για τη μακροπρόθεσμη

προστασία των ακτών από την ιλύ, που αργά αλλά σταθερά εναποτίθεται πλησίον των διαχυτήρων. Πράγματι τα επεξεργασμένα λύματα εξακολουθούν να έχουν ένα (μικρό) φορτίο αιωρούμενων στερεών, συχνά σε μορφή κολλοειδή, τα οποία με την έξοδό τους στο θαλασσινό περιβάλλον και τη δημιουργούμενη τύρβη της ανωστικής ροής του πλουμιού συσσωματώνονται, αποκτούν μεγαλύτερη διάμετρο και καθιζάνουν στην περιοχή γύρω από τον διαχυτήρα.

Η ελάχιστη αποδεκτή ταχύτητα μέσα στον υποβρύχιο αγωγό είναι μικρή, της τάξεως των 10 cm/sec, δεδομένου ότι τα λύματα θα υποβληθούν σε βιολογικό καθαρισμό και συνεπώς είναι απαλλαγμένα από άμμο και από ευκόλως καθιζάνοντα σωματίδια. Τα (οργανικά) μικροσωματίδια των επεξεργασμένων λυμάτων, που ενδεχομένως να εισέλθουν στον υποβρύχιο αγωγό, παρασύρονται εύκολα με την ταχύτητα των 10 cm/sec, γιατί η πυκνότητά τους βρίσκεται κοντά στο 1 gr/cm³. Εξάλλου είναι απίθανο τα στερεά σωματίδια με πυκνότητα 2.6 gr/cm³ να εισέλθουν στον υποβρύχιο αγωγό, γιατί θα έχουν ήδη συγκρατηθεί στον εξαμμωτήρα και στη δευτεροβάθμια δεξαμενή καθίζησης. Βεβαίως υφίσταται πάντα ο κίνδυνος εισόδου στερεών και διαφόρων θαλάσσιων οργανισμών (π.χ. μύδια) από τη θάλασσα στον υποβρύχιο αγωγό μέσα από τους διαχυτήρες κάτω από κατάλληλες συνθήκες, π.χ. παροχές πολύ χαμηλές τις βραδινές ώρες, αιωρούμενη άμμος λόγω θαλασσοταραχής κ.λπ.

Ο υποβρύχιος αγωγός για διαμέτρους έως και 1 μέτρο, που καλύπτει τις περισσότερες περιπτώσεις στον ελληνικό χώρο, είναι σκόπιμο να επιλέγεται από πολυαιθυλένιο HDPE, αντοχής 10 τουλάχιστον ατμοσφαιρών. Η επιλογή αυτή της αντοχής των 10 ατμοσφαιρών (ή παραπλήσιας) γίνεται για πρόσθετη ασφάλεια των αγωγών σε μηχανικές καταπονήσεις και όχι λόγω εμφάνισης τέτοιων πιέσεων. Πράγματι είναι χρήσιμο να υπάρχει μεγάλο περιθώριο ασφαλείας, έναντι κυρίως εξωτερικών φορτίων και καταπονήσεων πάνω στον υποβρύχιο αγωγό, τόσο κατά τη διάρκεια της πόντισης και του εγκιβωτισμού του αγωγού, όσο και κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του.

Ο υποβρύχιος αγωγός και ο διαχυτήρας οφείλουν να διαστασιολογούνται υδραυλικά για τη μέση σημερινή ωριαία παροχή, τη σημερινή μέγιστη ωριαία και τη μέγιστη ωριαία της σαραντακονταετίας. Σε περίπτωση μεγάλων διακυμάνσεων της παροχής είναι σκόπιμο ένας αριθμός των οπών του διαχυτήρα να κατασκευασθεί με προσωρινό κλείσιμο.

3. ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΑΡΑΙΩΣΗ ΓΙΑ ΕΚΡΟΗ ΑΠΟ ΤΟΝ ΥΠΟΒΡΥΧΙΟ ΑΓΩΓΟ ΧΩΡΙΣ ΔΙΑΧΥΤΗΡΑ

Η ελάχιστη αραίωση s_m σε οριζόντιο επίπεδο πάνω από την εκροή των λυμάτων ορίζεται ως ο λόγος c_0/cm , όπου c_0 και cm είναι αντιστοίχως οι συγκεντρώσεις οποιουδήποτε ρύπου στην εκροή και στο εξεταζόμενο οριζόντιο επίπεδο του υδάτινου αποδέκτη (θάλασσας). Η ελάχιστη αραίωση s_m στην επιφάνεια της θάλασσας πάνω από την εκροή του υποβρύχιου αγωγού οποιουδήποτε μεγέθους των λυμάτων (π.χ. BOD, κολοβακτηριδίων κ.λπ.) αντιστοιχεί στη μέγιστη

συγκέντρωση ρύπου. Δεδομένου ότι οι υγειονομικές διατάξεις προδιαγράφουν κάποια μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή του ρύπου, που περιέχεται στα λύματα για να θεωρηθεί μια θάλασσα κατάλληλη για κολύμβηση (π.χ. 500 E. Coli ανά 100 ml), είναι προφανές ότι η ικανοποίηση των υγειονομικών διατάξεων στην επιφάνεια της θάλασσας πάνω από την εκροή εγγυάται την ικανοποίησή τους στη ακτή. Ο σχεδιασμός της διάθεσης πρέπει να εξασφαλίζει αραίωση τουλάχιστον ίση με 400 φορές για τη μέση ημερήσια παροχή της 40ετίας και όχι λιγότερη από 200 για την ωριαία παροχή αιχμής. Οι τιμές αυτές συνιστώνται με βάση την εμπειρία μας και με κριτήριο να προκύπτουν τιμές στην επιφάνεια της θάλασσας τουλάχιστον δύο φορές μικρότερες από την ανώτατη τιμή για τα ολικά κολοβακτηριοειδή. Για μικρές κοινότητες, όπως θα φανεί από τα διαγράμματα που παρουσιάζονται στη συνέχεια, είναι δυνατή η επίτευξη αραίωσης ακόμα και πάνω από 1,000.

Στην παράγραφο αυτή εξετάζεται η περίπτωση διαθέσεως των λυμάτων στον θαλάσσιο αποδέκτη από το άκρο του υποβρύχιου αγωγού, που έχει διαμορφωθεί καταλλήλως, χωρίς διαχυτήρα. Από ρευστομηχανικής πλευράς, η ροή που δημιουργείται είναι σε βαθμιαία μετάπτωση από τη ροή φλέβας (jet) σε ροή καθαρού πλουμίου (plume). Οι ροές αυτές παρουσιάζουν διαφορετικό τρόπο αραίωσης (βλέπε List and Imberger [10], Kotsovinos [11], List [1, 2], Papanicolau and List [5], Kotsovinos [12]). Ο ορθός υπολογισμός της αραίωσης πρέπει να λαμβάνει υπόψη τη διαφορά αυτή. Για εκροή από μία μόνο οπή διαμέτρου D - αξισυμμετρική ανωστική φλέβα - συνιστάται ο υπολογισμός της ελάχιστης αραίωσης s_m με τη χρήση της ακόλουθης σχέσης (βλέπε Kotsovinos [13]):

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

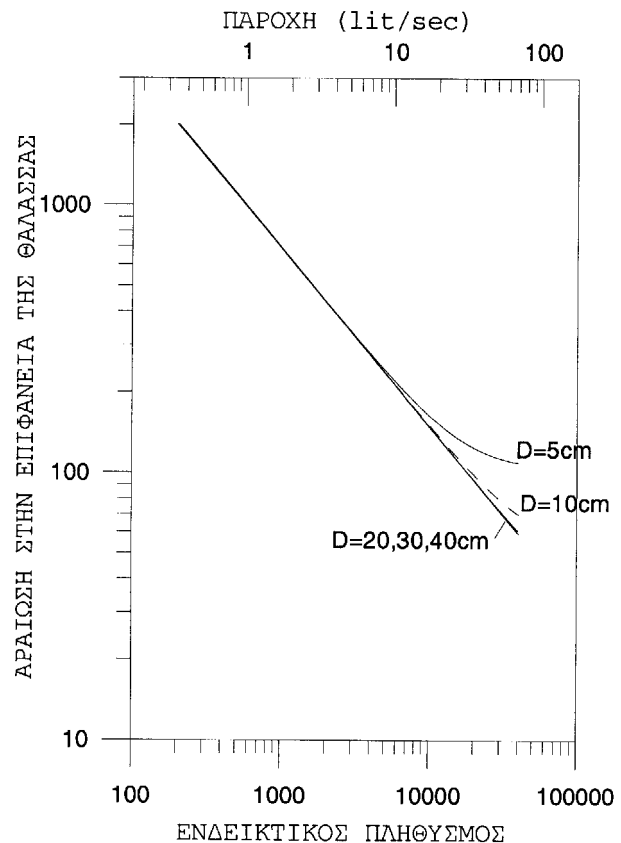
όπου x είναι η κατακόρυφη απόσταση από την εκροή και F_0 είναι ο αρχικός αριθμός Froude, που ορίζεται από τη σχέση:

$$F_0 = \frac{u_0}{\sqrt{\frac{\rho_a - \rho_0}{\rho_0} gD}} \tag{3.2}$$

όπου u_0 και ρ_0 είναι η ταχύτητα και η πυκνότητα αντίστοιχα των λυμάτων στην έξοδο, ρ_a η πυκνότητα της θάλασσας και g η επιτάχυνση της βαρύτητας. Η παραπάνω σχέση (3.1) έχει επαληθευτεί από πειραματικά αποτελέσματα πολλών ερευνητών και έχει ισχύ για την περιοχή της φλέβας, του πλουμίου, καθώς και τη μεταβατική περιοχή.

Για να έχει ο μελετητής έναν αρχικό τρόπο επιλογής της κατάλληλης διαμέτρου της οπής εκροής, παρουσιάζεται στη συνέχεια το νομογράφημα του σχήματος 1, στο οποίο έχει υπολογισθεί η αραίωση ως συνάρτηση του ενδεικτικού πληθυσμού (ή της παροχής), για διάφορες διαμέτρους από 5 έως 40 cm και για βάθος θάλασσας ίσο με 20 m. Για το νομογράφημα αυτό υποτέθηκε ημερήσια κατανάλωση του

εξυπηρετούμενου πληθυσμού ίση με 150 λίτρα νερού ανά κάτοικο, πυκνότητα λυμάτων $\rho_0=1 \text{ gr/cm}^3$ και πυκνότητα θάλασσας $\rho_a=1.024 \text{ gr/cm}^3$. Παρατηρούμε ότι η επιτυγχάνομενη αραίωση για πληθυσμό μικρότερο της τάξεως των 6,000 είναι πρακτικά ανεξάρτητη από τη διάμετρο της οπής. Παρατηρούμε, επίσης, ότι για πληθυσμό μεγαλύτερο της τάξεως του 2,000, δεν είναι δυνατό να επιτευχθεί αραίωση μεγαλύτερη από 400. Συνεπώς, για πληθυσμούς μεγαλύτερους της τάξεως του 2,000 είναι απαραίτητη η εγκατάσταση διαχυτήρα.



Σχήμα 1: Αραίωση στην επιφάνεια της θάλασσας από διάθεση λυμάτων σε βάθος 20 m από υποβρύχιο αγωγό με διάμετρο οπής D από 5 έως 40 cm.

Figure 1: Dilution on the sea surface resulting from outfall discharging sewage at a depth of 20 m, from a round port of diameter 5 to 40 cm.

4. ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΑΡΑΙΩΣΗ ΓΙΑ ΕΚΡΟΗ ΑΠΟ ΔΙΑΧΥΤΗΡΑ

4.1. Βασική θεωρία

Η ροή πάνω από διαχυτήρα μήκους L, με N οπές, διαμέτρου d, σε μεταξύ τους τυπική απόσταση 1.0 έως 1.5 μέτρων, αντιστοιχεί στη ροή N μεμονωμένων αξισυμμετρικών ανωστικών φλεβών, που αλληλοεπικαλύπτονται μετά από απόσταση 3 έως 4 m από το διαχυτήρα, δημιουργώντας μια διδιάστατη τυρβώδη ανωστική φλέβα. Η τυπική απόσταση 1.0 έως 1.5 μέτρων προκύπτει από την απαίτηση αλληλοκά-

λυσης των αξισυμμετρικών μεμονωμένων φλεβών ώστε να δημιουργηθεί διδιάστατη τυρβώδης ανωστική φλέβα. Έτσι για παράδειγμα για απόσταση των μεμονωμένων αξισυμμετρικών φλεβών 1.5 μέτρων η αλληλοκάλυψη θα αρχίσει περίπου σε απόσταση $(1.5 / 2) / 0.25 = 3$ μέτρων από το σημείο εκτόξευσης της φλέβας, όπου 0.25 είναι η εφαπτομένη της γωνίας που σχηματίζει η γενέτειρα του κώνου της αξισυμμετρικής φλέβας με τον άξονα συμμετρίας. Μετά την αλληλοεπικάλυψη των αξισυμμετρικών φλεβών η ροή είναι ισοδύναμη με τη διδιάστατη ανωστική φλέβα που προέρχεται από σχισμή μήκους L και εμβαδού ίσου με το εμβαδόν των N οπών. Μια ακριβής σχέση για τον υπολογισμό της ελάχιστης αραιώσης s_m σε επίπεδο κάθετο στον άξονα της ροής και σε απόσταση κατά μήκος του άξονα της ροής s έχει δημοσιευθεί από τους συγγραφείς της παρούσης εργασίας (βλ. Αγγελίδης και Κωτσοβίνος [14]), είναι η εξής:

$$s_m = 0.66F_0^{2/3} (\zeta + 1.36F_0^{-4/3})^{1/2} \left[1 - 1.59F_0^{-2} + (\zeta + 1.36F_0^{-4/3})^{3/2} \right]^{1/3} \quad (4.1)$$

όπου

$$\zeta = 0.51F_0^{-4/3} \left(\frac{s}{b} \right) \quad (4.2)$$

και b είναι το πλάτος της σχισμής μήκους L της ισοδύναμης διδιάστατης ροής, που εξομοιώνει την εκροή από N οπές διαμέτρου d , και ισούται με: $b = N(\pi d^2/4)/L$. F_0 είναι και πάλι ο αρχικός αριθμός Froude οριζόμενος από την σχέση:

$$F_0 = \frac{u_0}{\sqrt{\frac{\rho_a - \rho_0}{\rho_0} gb}} \quad (4.3)$$

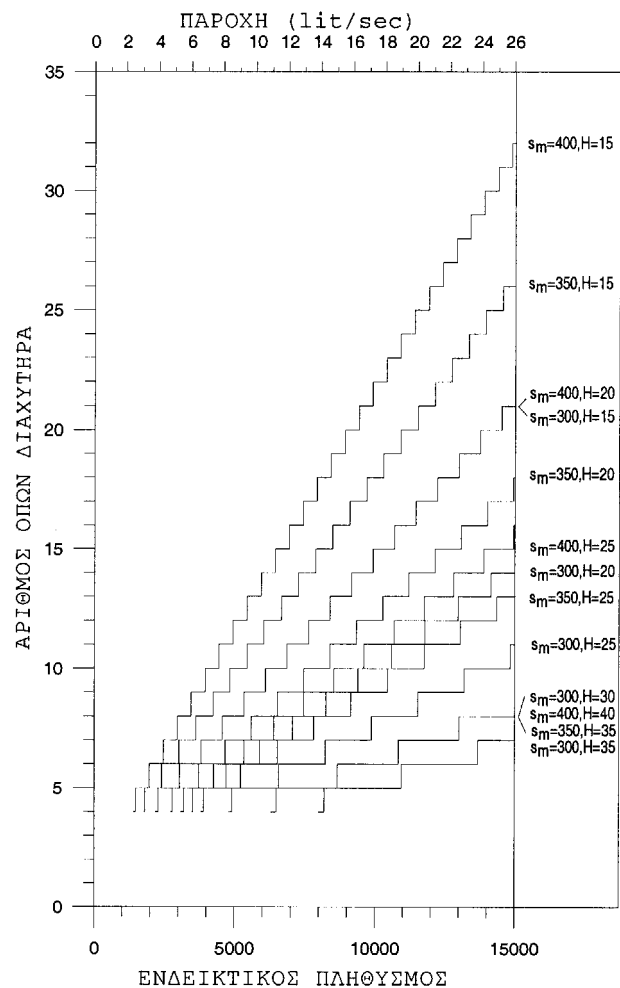
Η παραπάνω σχέση (4.1) είναι το αποτέλεσμα της ανάλυσης ενός ημιεμπειρικού μοντέλου, αντίστοιχο του οποίου δεν αναφέρεται στη διεθνή βιβλιογραφία, και ισχύει όχι μόνο για κατακόρυφα εκτοξευόμενες ανωστικές φλέβες αλλά και για οριζόντια ή υπό γωνία εκτοξευόμενες. Το μοντέλο αυτό έχει επαληθευτεί με πειραματικά αποτελέσματα διαφόρων ερευνητών για τις προαναφερθείσες γεωμετρίες εκτόξευσης, όπως Kotsovinos [11], Αγγελίδης [8], Hitchman [15], Papps [16]. Η σημαντική φυσική απόρροια αυτού του μοντέλου είναι ότι η αραιώση εξαρτάται με ρητή σχέση μόνο από την αδιάστατη παράμετρο ζ κατά μήκος του άξονα της ροής και η εξάρτηση από την αρχική γωνία εκτόξευσης είναι έμμεση μέσω του μήκους της τροχιάς s . Συνεπώς, για δεδομένες αρχικές συνθήκες ο φυσικός μηχανισμός της αραιώσης είναι πρακτικά ανεξάρτητος από την καμπύλη διαδρομή της ροής και μόνο το μήκος της διαδρομής είναι σημαντικό. Επίσης, η παραπάνω σχέση ισχύει για κάθε αρχικό πυκνομετρικό αριθμό Froude, δηλαδή για ροή φλέβας, για ροή πλουμίου καθώς και για την ενδιάμεση μεταβατική περιοχή.

4.2. Απλοποιημένος σχεδιασμός διαχυτήρα

Η διαδικασία σχεδιασμού ενός 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 στη συνέχεια το νομογράφημα του σχήματος 2, το οποίο έχει βασιστεί στη σχέση (4.1) και με το οποίο είναι δυνατή η απευθείας επιλογή του διαχυτήρα. Υποτέθηκε ημερήσια κατανάλωση 150 λίτρων νερού ανά κάτοικο, απόσταση μεταξύ των οπών του διαχυτήρα 1.25m και διάμετρος οπών 4.56cm.

Για κατακόρυφη διάθεση των λυμάτων, από το σχήμα 2, με βάση τον ενδεικτικό πληθυσμό, είναι δυνατό να επιλεγεί ο διαχυτήρας για τρεις επιθυμητές αραιώσεις (300, 350, 400) και για βάθη 15, 20, 25, 30, 35 και 40 m. Με βάση τον ενδεικτικό πληθυσμό σχεδιασμού, που βρίσκεται στον κάτω οριζόντιο άξονα, ή την αντιστοιχούσα παροχή λυμάτων, που βρίσκεται στον άνω οριζόντιο άξονα, μετακινούμαστε κατακόρυφα στο σχήμα αυτό μέχρι να



Σχήμα 2: Επιλογή διαχυτήρα με βάση τον ενδεικτικό πληθυσμό, την επιθυμητή αραιώση και το διατιθέμενο βάθος. Υποτέθηκε ημερήσια κατανάλωση 150 lit/άτομο, απόσταση οπών 1.25 m και διάμετρος οπών 4.56 cm.

Figure 2: Fundamental diffuser characteristics determination as a function of population, dilution and depth of discharge. It was supposed consumption 150 lit/person-day, ports' spacing 1.25 m and diameter of ports 4.56 cm.

συναντήσουμε την τεθλασμένη με την επιθυμητή αραιώση και το διαθέσιμο βάθος και στη συνέχεια οριζόντια και αριστερά διαβάσουμε τον αριθμό των οπών. Το μήκος του διαχυτήρα σε μέτρα ισούται με $L=(N-1)*1.25$, όπου N ο αριθμός των οπών. Έστω, για παράδειγμα, ότι στόχος μας είναι η επιλογή διαχυτήρα μιας πόλης 10,000 κατοίκων. Αν η επιθυμητή αραιώση είναι 350, τότε αυτό είναι εφικτό με διαχυτήρα μήκους 21.25m με 18 οπές για βάθος διάθεσης 15m ή με διαχυτήρα μήκους 13.75m με 12 οπές για βάθος διάθεσης 20m ή με διαχυτήρα μήκους 10m με 9 οπές για βάθος διάθεσης 25m ή με διαχυτήρα μήκους 6.25m με 6 οπές για βάθος διάθεσης 35m. Έτσι έχουμε τη δυνατότητα όχι μόνο απευθείας επιλογής του διαχυτήρα αλλά και εναλλακτικών λύσεων αναφορικά με το βάθος για τις συνήθεις περιπτώσεις μικρών πόλεων (έως 15,000 κατοίκους). Η τελική επιλογή γίνεται με κριτήρια το κόστος κατασκευής, την τοπογραφία του πυθμένα και την εκτίμηση της ανανέωσης των νερών της θάλασσας περιοχής. Τέλος, τονίζεται ότι η εμπειρία έχει δείξει ότι το συνολικό εμβαδό όλων των θυρίδων οφείλει να είναι μικρότερο από το εμβαδό μιας διατομής του διαχυτήρα. Ο λόγος αυτός λαμβάνεται συνήθως από 0.4 έως 0.66. Μικρές τιμές του λόγου αυτού βελτιώνουν την ομοιομορφία της παροχής εκροής από τις διάφορες θυρίδες, αυξάνουν όμως το απαιτούμενο ολικό ύψος ενέργειας.

Για μικρές κοινότητες με πληθυσμό της τάξεως έως 2,000 είναι ενδιαφέρουσα η χρήση διαχυτήρα, που διαμορφώνεται από τις απολήξεις ενός αριθμού υποβρύχιων αγωγών μικρής διατομής, που τερματίζουν διαδοχικά επί ευθείας σε κατάλληλες αποστάσεις 1.0 έως 1.5 m. Δηλαδή αντί της χρήσης μιας διατομής υποβρύχιου αγωγού από πολυαιθυλένιο HDPE της τάξεως μεγέθους Φ400, είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί ένας αριθμός μικρών διατομών της τάξεως Φ100 από εύκαμπτο σωλήνα, που διατίθεται σε ρολούς (κουλούρες), οι οποίοι μεταφέρουν την ίδια συνολική παροχή και τερματίζουν διαδοχικά επί ευθείας. Οι μεμονωμένες αξισυμμετρικές φλέβες, που εκρέουν από κάθε αγωγό, μετά την αλληλοκάλυψη σε απόσταση 3 έως 4m δημιουργούν μια διδιάστατη ανωστική φλέβα. Το πλεονέκτημα της διάταξης αυτής είναι η ευκολία πόντισης των εύκαμπτων αγωγών και το χαμηλότερο κόστος κατασκευής. Έτσι για μικρούς πληθυσμούς είναι δυνατόν να επιτευχθούν με τον παραπάνω τρόπο πολύ μεγάλες αραιώσεις της τάξεως του 1000. Αναφερόμενοι σε αραιώσεις πάνω από 1000 έχουμε κυρίως υπόψη μας συγκεντρώσεις του αριθμού κολοβακτηριοειδών. Σύμφωνα με την ΚΥΑ 46399/4352/86 (ΦΕΚ 438B/3-7-86), η οποία εξεδόθη σε συμμόρφωση με τις οδηγίες του Συμβουλίου των Ευρωπαϊκών Κοινοτήτων 75/440/ΕΟΚ, 76/160/ΕΟΚ, 78/659/ΕΟΚ, 79/923/ΕΟΚ και 79/869/ΕΟΚ, το επιθυμητό όριο του συνόλου των κολοβακτηριοειδών /100 ml είναι 500, ενώ το ανώτατο όριο είναι 10,000. Σε περίπτωση επεξεργασίας λυμάτων χωρίς χλωρίωση όπου ως γνωστόν ο αριθμός των ολικών κολοβακτηριοειδών είναι της τάξεως των 10,000 ανά cm^3 , τότε με 1,000 φορές αραιώση επιτυγχάνεται στην επιφάνεια της θάλασσας μέγιστη συγκέντρωση 10 ανά cm^3 . Η τιμή αυτή, σύμφωνα με την ανωτέρω ΚΥΑ, είναι 10 φορές μικρότερη από τη μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή για κολύμβηση και περίπου 2 φορές μεγαλύτερη από τη συ-

νιστώμενη τιμή του παραπάνω κανονισμού. Συνεπώς είναι φανερό ότι αν ληφθεί υπόψη και η πρόσθετη αραιώση από τον διαχυτήρα μέχρι την ακτή, είναι δυνατό με τον κατάλληλο σχεδιασμό του διαχυτήρα να αποφευχθεί η χλωρίωση των επεξεργασμένων λυμάτων, η οποία τόσα προβλήματα δημιουργεί στο περιβάλλον με τις χλωραμίνες (οργανοχλωριομένες ενώσεις). Από το σχήμα 3 με βάση τον ενδεικτικό πληθυσμό ή την παροχή λυμάτων είναι δυνατό να επιλεγεί ο απαιτούμενος αριθμός οπών (ή υποβρύχιων εύκαμπτων αγωγών), ώστε να επιτευχθεί αραιώση 1000 ή 1200 για βάθη εκροής 15m ή 20m. Για το νομογράφημα του σχήματος 3 υποτέθηκε ημερήσια κατανάλωση 150 λίτρων νερού ανά κάτοικο, απόσταση μεταξύ των οπών 1.25m και διάμετρος οπών 4.56cm.

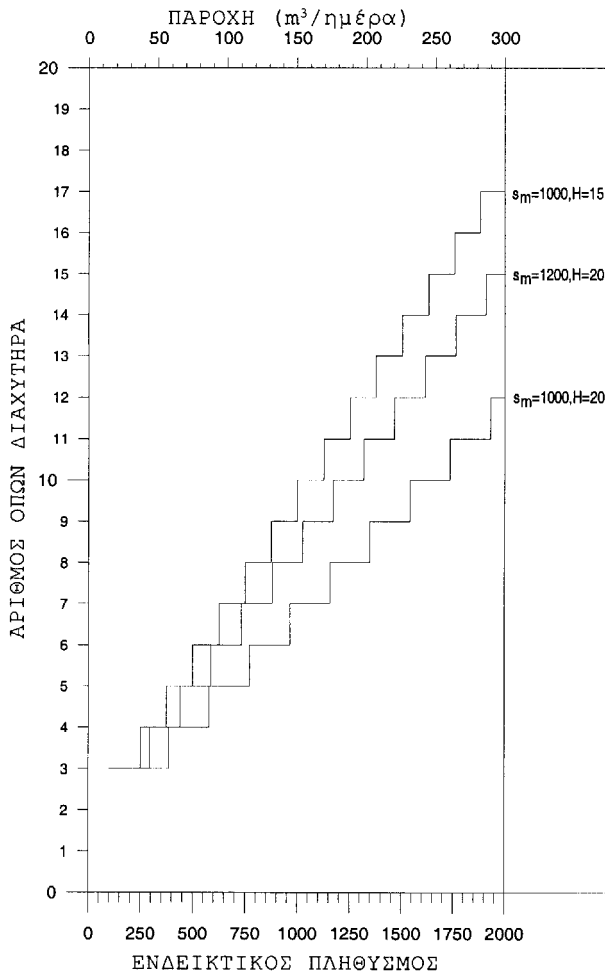
Για οριζόντια διάθεση των λυμάτων επιτυγχάνεται - για τις ίδιες αρχικές συνθήκες - καλύτερη αραιώση στην επιφάνεια της θάλασσας σε σχέση με την κατακόρυφη διάθεση, καθώς για μεγαλύτερο μήκος καμπύλης τροχιάς s σε σχέση με την κατακόρυφη απόσταση, προκύπτει από τη σχέση (4.1) μεγαλύτερη αραιώση. Έτσι έστω ότι είναι επιθυμητή αραιώση s_m και το διατιθέμενο κατακόρυφο βάθος είναι x . Από τα σχήματα 2 ή 3 είναι δυνατό να επιλεγεί ο κατάλληλος διαχυτήρας με βάση τον ενδεικτικό πληθυσμό σχεδιασμού για κατακόρυφη διάθεση των λυμάτων. Αν τώρα, αντί της κατακόρυφης εκτόξευσης, τα λύματα διατεθούν οριζόντια, τότε για μήκος της καμπύλης τροχιάς s μεγαλύτερο της κατακόρυφης απόστασης x θα επιτευχθεί μεγαλύτερη αραιώση s'_m η οποία ισούται με:

$$s'_m = s_m (s/x) \quad (4.4)$$

Η μόνη δυσκολία για τον μελετητή μηχανικό είναι να υπολογίσει το μήκος της καμπύλης τροχιάς s κατά μήκος του άξονα της ροής.

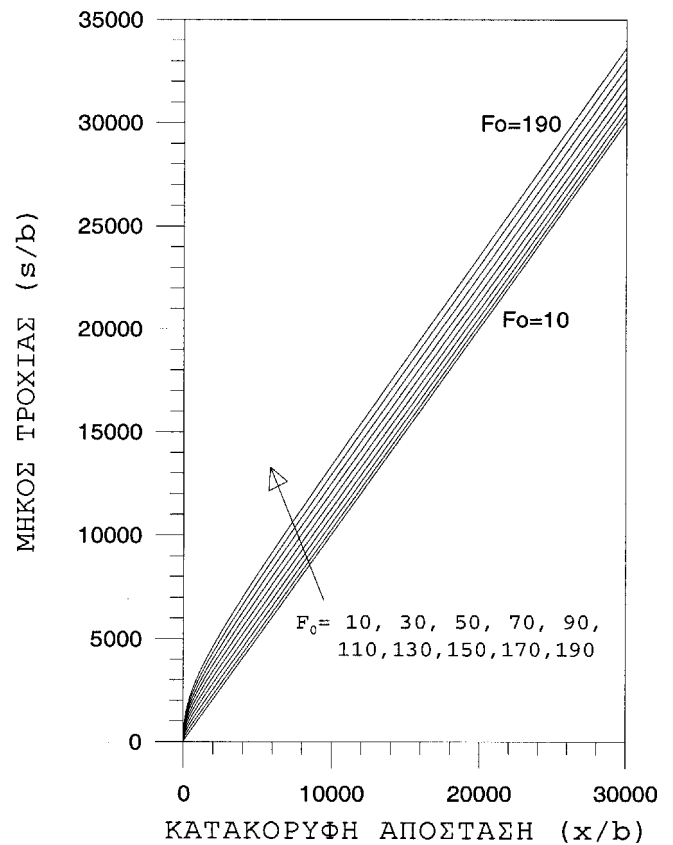
Για την υπό γωνία εκτοξευόμενη διδιάστατη ανωστική φλέβα έχει αναπτυχθεί ένα ολοκληρωματικό μοντέλο, βλέπε Αγγελίδης [8], το οποίο έχει ορισμένες βελτιώσεις έναντι παρόμοιων μοντέλων άλλων ερευνητών. Οι σημαντικότερες βελτιώσεις αυτού του μοντέλου είναι: α) η αρχή της διατήρησης της ροής ανιχνευτή (tracer), ο οποίος δημιουργεί τη διαφορά πυκνότητας και ο οποίος στην πράξη μπορεί να είναι διαφορά αλατότητας ή διαφορά θερμοκρασίας ή και τα δύο μαζί, β) ο συνυπολογισμός της τυρβώδους ροής του ανιχνευτή κατά την ολοκλήρωση καθέτως προς τον άξονα, και γ) ο μεταβλητός συντελεστής συμπαράσυρσης εξαρτώμενος από τον τοπικό αριθμό Richardson. Αυτό το μοντέλο προβλέπει με ικανοποιητική ακρίβεια τα πειραματικά αποτελέσματα σχετικά με την αξονική αραιώση και την τροχιά. Με βάση το αριθμητικό αυτό μοντέλο, βλέπε Angelidis [17], έχουν σχεδιαστεί στο σχήμα 4 η αδιάστατη αξονική απόσταση (s/b) ως συνάρτηση της αδιάστατης κατακόρυφης απόστασης (x/b) για διάφορους αρχικούς αριθμούς Froude F_0 για οριζόντια εκτοξευόμενη ανωστική φλέβα. Έτσι ο μελετητής μηχανικός μπορεί να επιλέξει από τα σχήματα 2 ή 3 τον διαχυτήρα για κατακόρυφη διάθεση των υγρών αποβλήτων, στη συνέχεια να υπολογίσει από το σχήμα 4 το

μήκος της καμπύλης τροχιάς s , και τέλος να υπολογίσει από τη σχέση (4.4) την αραιώση που θα επιτευχθεί σε περίπτωση οριζόντιας διάθεσης με τον ίδιο διαχυτήρα.



Σχήμα 3. Διαμόρφωση διαχυτήρα με βάση τον ενδεικτικό πληθυσμό (ή την παροχή), την επιθυμητή αραιώση και το διατιθέμενο βάθος για μικρές κοινότητες με ενδεικτικό πληθυσμό της τάξεως έως 2000. Υποτέθηκε ημερήσια κατανάλωση 150 lit/άτομο, απόσταση οπών 1.25 m και διάμετρος οπών 4.56 cm.

Figure 3. Diffuser design for small communities (up to 2000 inhabitants) based on population, dilution and depth of discharge. It was supposed consumption 150 lit/person-day, ports' spacing 1.25 m and diameter of ports 4.56 cm.



Σχήμα 4: Υπολογισμός του μήκους τροχιάς (s/b) ως συνάρτηση του βάθους (x/b).

Figure 4: Computation of the length of the trajectory (s/b) as a function of the depth (x/b).

4.3. Παράδειγμα εφαρμογής

Έστω για παράδειγμα ότι για ενδεικτικό πληθυσμό σχεδιασμού 10,000 κατοίκων είναι επιθυμητή αραιώση 350 και το διατιθέμενο βάθος είναι 20m. Από το σχήμα 2 επιλέγεται διαχυτήρας με 12 οπές μήκους 13.75m. Εύκολα μπορούν να υπολογιστούν το ισοδύναμο πλάτος σχισμής $b=0.142\text{cm}$, η αρχική ταχύτητα των λυμάτων $u_0=88.6\text{cm/sec}$ και ο αρχικός αριθμός Froude $F_0=48.5$ (διαφορά πυκνότητας θάλασσας και λυμάτων περίπου 0.024gr/cm^3). Από το σχήμα 4 για αδιάστατη κατακόρυφη απόσταση $x/b=2000/0.142=14084$ και για $F_0=48.5$ προκύπτει αδιάστατο μήκος καμπύλης τροχιάς $s/b=14650$ και συνεπώς $s=20.80\text{m}$. Άρα, αν η διάθεση των λυμάτων γίνει οριζόντια με τον ίδιο διαχυτήρα, τότε θα επιτευχθεί αραιώση $s'_m=350*(20.80/20.00)=364$.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται εύχρηστα διαγράμματα για τον υπολογισμό του αριθμού των οπών του διαχυτήρα με βάση την παροχή των λυμάτων και την επιθυμητή αραιώση. Συγκεκριμένα παρουσιάζονται διαγράμματα για την απευθείας εκλογή των χαρακτηριστικών του διαχυτήρα - χωρίς επαναληπτικές δοκιμές - με βάση τον ενδεικτικό πληθυσμό, το διατιθέμενο βάθος και την επιθυμητή αραιώση, τόσο για κατακόρυφη όσο και για οριζόντια διάθεση των υγρών αποβλήτων. Ακόμη για μικρούς πληθυσμούς υποδεικνύεται η διαμόρφωση κατάλληλου διαχυτήρα με στόχο την επίτευξη αραιώσης μεγαλύτερης του 1,000, ώστε να μειωθεί ή να εξαλειφθεί η απαίτηση για χλωρίωση των λυμάτων πριν από τη διάθεσή τους στη θάλασσα.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- List, E. J. 1982a, "Turbulent jets and plumes", **Ann. Rev. Fluid Mech.**, vol. **14**, pp. 189-212.
- List, E. J., 1982 b, "**Turbulent buoyant jets and plumes**", Edited by W. Rodi, Chap. 1, pp. 1-68. Pergamon, Oxford.
- Kotsovinos, N. E., 1977, "Plane turbulent buoyant jets. Part 2. Turbulence structure", **J. Fluid Mech.**, vol. **81**, pp. 45-62.
- Kotsovinos, N. E., 1985, "Temperature measurements in a turbulent round plume", **Int. J. Heat Mass Transfer**, vol. **28**, pp. 771-777.
- Papanicolau, P. N. and List, E. J., 1988, "Investigations of round vertical buoyant jets", **J. Fluid Mech.**, vol. **195**, pp. 341-391.
- Lemieux, G. P., 1983, "**An experimental study of the effects of Reynolds number and buoyancy upon the structure of inclined turbulent two-dimensional jets**", Ph.D. Thesis, Kingston, Ontario, Queen's University.
- Abdel-Rahman, A., 1987, "**An experimental investigation of a buoyant turbulent plane jet with streamline curvature**", Ph.D. Thesis, Ontario, University of Waterloo.
- Αγγελίδης, Π. Β., 1993, "**Προσομοίωση ρύπανσης επιφανειακών υδάτων από διδιάστατους διαχυτήρες**", διατριβή για τον τίτλο του διδάκτορα, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, Ξάνθη.
- Papps, D. A. and Wood, I. R., 1997, "The effect of an intermittent flapping motion on the properties of merging plumes", **J. Hydraulic Research**, vol. **35**, No 4.
- List, E. J. and Imberger, J., 1973, "Turbulent entrainment in buoyant jets and plumes", **J. Hyd. Div., (ASCE)**, vol. **99**, pp. 1461-1474.
- Kotsovinos, N. E., 1975, "**A study of the entrainment and turbulence in a plane buoyant jet**", Ph.D. Thesis, California Institute of Technology, Pasadena.
- Kotsovinos, N.E., 1991, "Turbulence spectra in free convection flow", **Phys. Fluids**, pp. 163-167.
- Kotsovinos, N. E., 1978, "Dilution in a vertical round buoyant jet", **J. Hydraulics Division**, HY5, pp. 795-798.
- Αγγελίδης, Π. Β. και Κωτσοβίνος, Ν. Ε., 2000, «Ημειπειρικό μοντέλο διδιάστατης καμπύλης ανωστικής φλέβας και η πειραματική επαλήθευση», **8ο Πανελλήνιο Συνέδριο της Ελληνικής Υδροτεχνικής Ένωσης**, Αθήνα.
- Hitchman, G. J., Abdel-Rahman, A. A., Slawson, P. R., Strong, A. B., 1989, "Mean flow characteristics of a turbulent plane jet with buoyancy induced curvature", **Experiments in Fluids**, vol. 8, pp. 77-85.
- Papps, D. A., 1995, "**Merging buoyant jets in stationary and flowing ambient fluids**", Ph.D. Thesis, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand.
- Angelidis, P. B., 1999, "A numerical model for the mixing of an inclined submerged heated plane water jet in calm fluid", **submitted for publication**.

Ν.Ε.Κωτσοβίνος,

Καθηγητής Δ.Π.Θ., Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Β. Σοφίας 10, Ξάνθη 671 00.

Π.Β. Αγγελίδης,

Δρ Πολιτικός Μηχανικός, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος Δ.Π.Θ., Β. Σοφίας 10, Ξάνθη 671 00.

Extended summary

Wastewater Disposal from a Small Coastal City

N. E. KOTSOVINOS

Professor D.U.TH.

P. B. ANGELIDIS

Dr Civil Engineer

Abstract

The basic objective of this paper is to provide the consulting engineer with technical information regarding the design of the submarine diffuser for small cities (population 400 to 15000 into the habitants), which discharge treated wastewater open sea. In particular, we present an approach to choosing the number of ports and the length of the diffuser as a function of the population, the depth of discharge and the desirable dilution. We advocate the use of a robust formula to calculate the concentration of the pollutants at the surface of the sea due to the wastewater discharge through the diffuser ports. When the depth of the sea at the diffuser location is 20m and the population exceeds 2000 habitants, the use of a multiport diffuser is necessary. The achievement of high initial dilution for small communities may render chlorination unnecessary when the treated wastewater is discharged into the open sea.

c_m	concentration along the jet axis
c_0	initial concentration
d	diameter of diffuser's round ports
D	diameter of orifice
F_0	initial densimetric Froude number
g	acceleration of gravity
L	length of diffuser
s	distance along the jet axis from the origin
s_m	dilution along the jet axis
u_0	initial velocity of wastewater
x	depth of discharge

1. INTRODUCTION

Release of wastewater from a coastal city raises questions of siting and initial dilution. The design engineer must choose the best particular design to meet the basic objectives of achieving sufficient dispersion and mixing of the effluent with the receiving water, so that quality standards are not violated. The initial dilution in an outfall diffusion system for sewage effluent depends primarily on the discharge, the length of the diffuser, the number, size and spacing of the ports, the depth of the discharge, and the ambient currents and density stratification. Among these, only the length, the number, size and spacing of the ports, and the depth of discharge are under the control of the engineer.

The basic objectives of this paper are: a) to advocate the use of a robust formula to calculate the concentration of the pollutants at the surface of the sea due to the wastewater discharge through the diffuser ports; b) to simplify the design process by determining the fundamental diffuser characteristics directly without iterations.

SYMBOLS

ζ	normalized buoyant jet parameter
ρ_a	ambient density
ρ_0	wastewater density at the jet exit
b	width of the two dimensional jet slot

2. DESIGN CHARACTERISTICS OF SUBMARINE PIPELINE

The choice of diameter of the submarine pipeline is based on a balance of initial cost, operating cost (pumping), and maintaining adequate velocities for flushing. The design period must be a period of 40 years. The diffuser must be placed at a suitable topographic site, at a distance of at least 500m, and ideally between 750m and 1000m from the coast. The depth of discharge must be 20m or greater. The velocity of flow in the pipe must be high enough, at least 10cm/sec, to prevent deposition. The submarine pipeline for small diameters, up to 1 m, should be made from polyethylene HDPE of compression strength at least 10 atm. The submarine pipeline and the diffuser must be designed for the mean hourly flow today, for the peak hourly flow today and for the peak hourly flow over a 40- year period.

3. DILUTION RESULTING FROM OUTFALL DISCHARGING SEWAGE FROM A ROUND PORT

The goal of the design is to accomplish dilution at least 400 times for the mean daily flow of a period of 40 years and at least 200 times for the peak hourly flow. For discharging from a single port of diameter D - axisymmetric buoyant jet - the estimation of the dilution s_m on the sea surface should be

made with the use of the following equation (see Kotsovinos [13]):

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

where x is the depth of the sea and F_0 is the initial Froude number, which is defined as:

$$F_0 = \frac{u_0}{\sqrt{\frac{\rho_a - \rho_0}{\rho_0} gD}} \quad (3.2)$$

where u_0 and ρ_0 are the initial velocity and the initial density of wastewater at the jet exit, ρ_a is the density of the ambient fluid and g is the acceleration of gravity. To help the design engineer to choose the suitable diameter of the round port, we propose the diagram of Figure 1, where the dilution is given as a function of population, for various diameters of round port (5cm to 40cm) and for a depth of 20m. This assumes 150 lit of water consumption per day per inhabitant. As we see in Figure 1, when the population exceeds 2000 inhabitants, we cannot achieve dilution greater than 400 times. So the use of a multiport diffuser is necessary.

4. DILUTION RESULTING FROM OUTFALL DISCHARGING SEWAGE FROM A MULTIPORT DIFFUSER

The flow over a diffuser of length L , with N ports of diameter d and typical spacing 1.0m to 1.5m, corresponds to the flow produced from N individual axisymmetric buoyant jets, which cover each other after a distance 3m to 4m, forming a two dimensional buoyant jet. So the flow is equivalent to the two-dimensional buoyant jet which is produced from a slot of length L and area equal to the total area of N ports. An accurate equation for the calculation of dilution s_m in a plane perpendicular to the jet axis and at a distance s along the jet axis has been published by the authors of this work (see Αγγελίδης και Κωτσοβίνος [14]), and is given by:

$$s_m = 0.66F_0^{2/3} (\zeta + 1.36F_0^{-4/3})^{1/2} \cdot [1 - 1.59F_0^{-2} + (\zeta + 1.36F_0^{-4/3})^{3/2}]^{1/3} \quad (4.1)$$

where

$$\zeta = 0.51F_0^{-4/3} \frac{s}{b} \quad (4.2)$$

and b is the width of the equivalent slot of length L and is calculated as: $b = N(\pi d^2/4)/L$. F_0 is again the initial Froude number, which is defined as:

$$F_0 = \frac{u_0}{\sqrt{\frac{\rho_a - \rho_0}{\rho_0} gb}} \quad (4.3)$$

The diffuser design process is basically iterative; the final chosen design is usually the culmination of many trials. Figure 2 shows a diagram to avoid iterations and save time in the design process. This diagram is based on the equation (4.1) and helps to choose the diffuser characteristics directly.

For small communities with population up to 2000 inhabitants it is possible to achieve (see Figure 3) - using suitable diffusers - dilution as much as 1000 times or greater. This may render the chlorination unnecessary when the treated wastewater is discharged into the open sea.

When the discharge from the diffuser issues horizontally instead of vertically, the dilution obtaining s'_m at the sea surface is greater, for the same initial conditions. This happens, because as we see in Equation (4.1) the dilution is proportional to the length of the trajectory s , which is greater than the depth x . For this case the dilution is given by:

$$s'_m = s_m (s/x) \quad (4.4)$$

The length of the trajectory s can be computed from Figure 4.

N.E. Kotsovinos,

Professor, Dept. of Civil Engineering, D.U.TH., B. Sofias 10, Xanthi 671 00.

P.B. Angelidis,

Dr Civil Engineer, Dept. of Environmental Engineering, D.U.TH., B. Sofias 10, Xanthi 671 00.