

تخلیه فاضلاب به دریا گزینه مطلوب برای دفع فاضلاب شهری در مناطق ساحلی

نعمت... جعفرزاده***

ناصر حاجی زاده**

افشین تکدستان*

(دریافت ۸۳/۲/۵ پذیرش ۸۳/۹/۲)

چکیده

در شهرهای ساحلی دفع فاضلاب خام شهری یا پساب تصفیه مقدماتی به داخل دریا و اقیانوس از نظر اقتصادی به صرفه تر از تصفیه ثانویه فاضلاب می باشد. در این روش، فاضلاب به وسیله لوله هایی در فاصله ای دور از ساحل در ته دریا در چند نقطه توسط دیفیوزر تخلیه می گردد. امروزه بسیاری از محققان و صاحب نظران، گزینه تخلیه به دریا را برای شهرهای ساحلی در مقایسه با سایر روش های تصفیه، گزینه مطلوب می دانند. هدف از ارائه این مقاله معرفی این گزینه به عنوان یک روش دفع فاضلاب و ملاحظات اساسی در طراحی آن با توجه به خصوصیات مختلف دریا از قبیل شوری، دانسیته، درجه حرارت، لایه بندی و نوع جریان می باشد. به علاوه طراحی این سیستم در شرایط بحرانی که فاقد جریان مناسب است و لایه بندی حرارتی نیز وجود دارد مرور می گردد. این تحقیق با استفاده از مطالعات کتابخانه ای، جستجوی اینترنتی و ملاحظات سازه ای در کشورها و شهرهای ساحلی مختلف جهان به دست آمده است. هم چنین طراحی این سازه در بحرانی ترین شرایط دریایی مورد بررسی قرار گرفته است. در این روش دفع، علاوه بر این که فاضلاب تحت شرایط ترقیق اختلاط و پارامترهای طبیعی تصفیه می گردد، مناطق حساس ساحلی که به منظور شنا و فعالیت های ماهی گیری به شمار می رود از آلاینده های مختلف در امان می باشند. معمولاً هیچ استانداردی برای خروجی فاضلاب از دیفیوزرهای تخلیه از نظر پارامترهای DO، BOD، کلیفرم و مواد مغذی در منطقه اختلاط اولیه وجود ندارد. هنگامی که فاضلاب توسط فاضلابروها وارد دریا می گردد، بسته به خصوصیات و پارامترهای دریایی نظیر لایه بندی حرارتی، لایه بندی شوری، لایه بندی دانسیته و جریانات دریایی و پارامترهای طراحی ترقیق و اختلاط اولیه که تحت کنترل طراح است تصفیه می گردد.

واژه های کلیدی: دریا، طراحی آفتال، دفع فاضلاب، اختلاط اولیه، ترقیق، محیط زیست

Outfall as a Suitable Alternative for Disposal of Municipal Wastewater in Coastal Areas

Takdastan, A., Hajyzadeh, and A. Jafarzadeh, N

Abstract

Disposal of raw municipal wastewater or effluent of preliminary treatment into the sea and ocean is economically more accepted and technically more efficient than secondary treatment. In this method, the wastewater disposed at the bottom of the sea in some points from diffuser. Nowadays, lots of researchers select outfall as a suitable alternative treatment method for coastal cities. The goal of this paper was to introduce the outfall as a wastewater treatment method and its design criteria considering different characteristics of the sea such as salinity, density, temperature, stratification etc. In addition, stagnant sea and thermal stratification is reviewed. In this paper the latest information were reviewed. In this alternative the wastewater treated under dilution, mixing and natural conditions. Moreover, sensitive coastal point are preserved from different wastewater pollutants. Usually, there is no limitation regarding discharge of coliform, DO, BOD, and nutrient concentrations in initial mixing zoom. The parameters such as thermal stratification, salinity stratification, density stratification, marine flows influence design of outfall.

* عضو هیأت علمی دانشگاه جندی شاپور اهواز و دانشجوی دکتری مهندسی عمران محیط زیست دانشگاه تهران

** عضو هیأت علمی دانشکده محیط زیست تهران و مسئول مرکز اقیانوس شناسی تهران

*** مدیر گروه و عضو هیأت علمی گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت دانشگاه علوم پزشکی جندی شاپور اهواز

باکتری‌ها و ترکیبات سمی و دیگر آلاینده‌ها در سطح قابل قبولی کاهش یابند و غلظت اکسیژن محلول در آب دریا در حداقل میزان قابل قبول حفظ گردد و مواد آلی و مغذی موجود در فاضلاب ایجاد مشکل نکند. وقتی فاضلاب به این روش به داخل دریا می‌ریزد، تحت فرایندهای فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی تصفیه می‌گردد [۱ و ۲].

رابرت از محققانی است که بیشترین تحقیق را روی این روش انجام داده است. او پیشنهاد کرد که قبل از تخلیه فاضلاب خام به دریا، پیش تصفیه فاضلاب ضروری است. از طرفی به جای یک نقطه، تخلیه فاضلاب از چند نقطه توسط طراحی مناسب دیفیوزرها صورت گیرد [۱، ۵ و ۶].

در یک پروژه تخلیه که در نیوزلند طراحی شده طول فاضلابرو ۲/۸ کیلومتر می‌باشد و فاضلاب تولیدی جمعیت ۵۰۰۰۰ نفر را تخلیه می‌کند. به علاوه این گزینه فاضلاب صنعتی دو کارخانه کشتارگاه، دو کارخانه پشم بافی و سه کارخانه عمل‌آوری مواد غذایی را وارد دریا می‌کند. در انگلستان نیز در یک منطقه معروف توریستی فاضلابروهای با طول ۲/۷ کیلومتر در سال ۱۹۸۵ طراحی شد که فاضلاب آن ناحیه بعد از پیش تصفیه وارد دریا می‌شود. در ایالت متحده و استرالیا نیز پروژه‌های متعددی طراحی و بهره‌برداری شد. مثلاً در سن دیاگو فاضلابروی با قطر ۱۳۲ فوت با طول کانال ۱۸۹۷۰ فوت برای متوسط دبی برابر ۱۷۴ میلیون گالن در روز و با حداکثر دبی ۳۳۳ میلیون گالن در روز در سال ۱۹۷۵ طراحی و بهره‌برداری شد. در بوستون نیز فاضلابروی با قطر ۷/۳ متر برای ظرفیت فاضلابی برابر ۵۵ مترمکعب در ثانیه ساخته شد. در کالیفرنیا نیز در سال ۱۹۷۱ فاضلابروی با طول ۲۱۴۰۰ فوت و قطر ۱۲۰ اینچ و با طول دیفیوزر ۶۰۰۰ فوت برای متوسط دبی معادل با ۴۵۰ فوت مکعب در ثانیه طراحی و بهره‌برداری شد [۱، ۵، ۶ و ۷].

اقیانوس‌ها، دریاها و دریاچه‌های بزرگ ظرفیت جذب بالایی برای دریافت فاضلاب در شهرهای ساحلی دارند. مناطق ساحلی که به عنوان مرز مشترک بین دریاها، اقیانوس‌ها و دریاچه‌های بزرگ با خشکی محسوب می‌گردند، بسیار فعال و حساس‌اند به طوری که ۹۰٪ ماهی‌گیری در این منطقه انجام می‌شود و ۶۰٪ جمعیت جهان در این مناطق زندگی می‌کنند. این مناطق حدود ۸٪ حجم و ۰/۵٪ سطح دریاها و اقیانوس‌ها را شامل می‌شود.

در شهرهای ساحلی دفع فاضلاب در اقیانوس‌ها و دریاها در مقایسه با تصفیه ثانویه فاضلاب اقتصادی‌تر است. بسیاری از محققان و صاحب‌نظران از جمله وود^۱ معتقدند که تصفیه ثانویه فاضلاب هزینه ساختمانی، زمین، نگهداری، بهره‌برداری و انرژی بالایی نیاز دارد و تولید و دفع لجن بایستی به طور مداوم تحت کنترل باشد. ولی با طراحی صحیح و مناسب تخلیه به دریا^۲ حجم زیادی از فاضلاب را می‌توان بدون نیاز به بهره‌برداری و نگهداری وارد دریا کرد، به طوری که تصفیه در نتیجه ترقیق و اختلاط مناسب به شکل طبیعی انجام گیرد. در این روش فاضلاب به وسیله لوله‌هایی دور از ساحل در ته دریا و یا اقیانوس در یک یا چند نقطه تخلیه می‌شود. این لوله‌ها بر روی کف بستر دریا و یا به وسیله تونل زنی کار گذاشته می‌شوند. شکل ۱ نمونه‌ای از فاضلابروهای تونلی را نشان می‌دهد [۱، ۳ و ۵].

اگرچه فاضلاب خام را بدون مشکل زیاد می‌توان بدین روش دفع کرد ولی بهتر است اشیای بزرگ، آشغال‌ها، مواد دانه‌ای (شن و ماسه) و ترکیبات شناور (روغن و گریس) قبل از دفع توسط این روش حذف و جداسازی گردد. هدف اصلی تخلیه فاضلاب در دریا و اقیانوس‌ها به نحوی است که حداقل اثر را روی آبهای پذیرنده داشته باشد. به عبارت دیگر غلظت

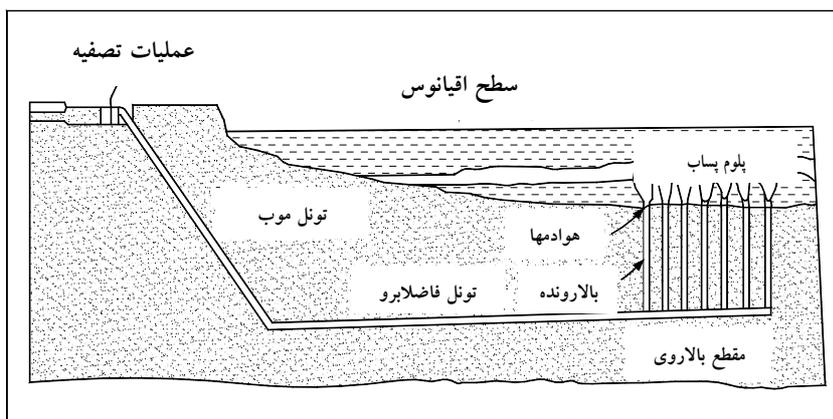
¹ Wood

² Out fall

سطح نمی‌رسد؛ اما اگر لایه‌بندی ضعیف و یا وجود نداشته باشد پلوم به سطح آب می‌رسد در نتیجه اختلاط و ترقی فاضلاب با آب محیطی بالاست [۱۱]. دانسیته فاضلاب تابع درجه حرارت فاضلاب و تا حد کمتری تابع میزان مواد جامد معلق می‌باشد. از طرفی دانسیته آب دریا تابع شوری، درجه حرارت و فشار است؛ به طوری که با افزایش دما، دانسیته کاهش یافته ولی با افزایش شوری و

بروکس در سال ۱۹۸۴ پدیده‌هایی که در اثر انتقال فاضلاب در دریاها و اقیانوس‌ها به وسیله فاضلابرو صورت می‌گیرد را طبق جدول ۱ نشان داد. اختلاط اولیه یا فیلد نزدیک تحت کنترل مهندس طراح است و اختلاط در نتیجه نیروهای شناوری و ممتوم در هنگام تخلیه فاضلاب صورت می‌گیرد. اختلاط اولیه در آب دریایی که لایه‌بندی حرارتی داشته باشد، پلوم^۱ به

¹ Plume



شکل ۱- نوعی از فاضلابروی تونلی جهت تخلیه فاضلاب به داخل آب دریا

جدول ۱- فرایندها و مقیاس‌های تقریبی در اثر تخلیه فاضلاب به دریا [۱]

مقیاس زمانی	مقیاس طولی (متر)	پدیده	فاز
۱ تا ۱۰ دقیقه	۱۰ تا ۱۰۰۰	اختلاط در اثر نیروی شناوری و ممتوم	اختلاط اولیه
۱ تا ۲۰ ساعت	۱۰۰ تا ۱۰۰۰۰	انتقال آلاینده به وسیله جریانات دریایی و پخش توسط توربولانس دریایی	فیلد دور
۱ تا ۱۰۰ روز	۱۰۰۰۰ تا ۱۰۰۰۰۰	جریانات در مقیاس بزرگ: زیر و رو شدن آب دریا و پدیده ته‌نشینی	دوره طولانی جریان

و با استفاده از شوری و درجه حرارت می‌توان دانسیته آب دریا را محاسبه کرد. امروزه از پارامتر شوری به عنوان فاکتور رقت در اثر تخلیه فاضلاب به داخل آب دریا استفاده می‌شود [۱].

بنابراین وجود و یا عدم وجود لایه‌بندی می‌تواند تشدید کننده و تضعیف کننده توربولانس و اختلاط

فشار (افزایش عمق آب) دانسیته افزایش می‌یابد. لایه‌بندی در دریا علاوه بر درجه حرارت، بر اثر شوری و دانسیته نیز اتفاق می‌افتد. دستگاه CTD به طور هم‌زمان هدایت الکتریکی، درجه حرارت و عمق آب در دریا را اندازه‌گیری می‌کند که به وسیله حرارت و هدایت الکتریکی، شوری آب دریا اندازه‌گیری می‌شود

پخش آلاینده‌ها به وسیله این روش، اختلاط آلاینده‌ها در حجم وسیعی از آب دریا از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. اگر سیستم پایدار باشد، اختلاط آلاینده‌ها صورت نمی‌گیرد؛ در صورتی که در یک سیستم ناپایدار اختلاط به خوبی صورت گرفته و توربولانس تشدید می‌یابد. اگر در لایه‌بندی، آب با دانسیته کمتر بر روی آب با دانسیته بیشتر قرار گیرد، سیستم پایدار است و تمایل به اختلاط عمودی وجود ندارد و عمل ترقیق آلاینده‌ها با آب محیطی پایین است. در این حالت

$$df / dz < 0$$

در صورتی که آب با دانسیته بیشتر بر روی آب با دانسیته کمتر قرار گیرد، تمایل به حرکت عمودی وجود دارد و اختلاط آلاینده‌ها با آب محیطی به شدت انجام می‌گیرد. در این حالت

$$df / dz > 0$$

در حالت طبیعی فرض بر این است که یک بسته آب در هر عمقی از دریا رها شود به همان حالت باقی می‌ماند و هیچ مقاومتی از خود نشان نمی‌دهد که در این حالت سیستم پایدار است؛ یعنی

$$df / dz = 0$$

برای پایداری آب روابط پیچیده ریاضی وجود دارد. تغییرات آدیاباتیک دما (δt) به وسیله رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

(۱)

$$\delta t = (dt / dp)_{\text{adia}} * \delta p$$

به عبارت دیگر با استفاده از گرادیان دما و فشار می‌توان (δt) را محاسبه کرد. از طرفی علامت منفی به علت dz می‌باشد. با جایگزینی معادلات می‌توان نوشت

(۲)

$$\delta p = -ag\delta z$$

(۳)

$$\delta t = -(dt / dp)_{\text{adia}} * ag\delta z$$

به مقدار $(dt / dp)_{\text{adia}} * ag$ اصطلاحاً گاما (Γ) یا گرادیان آدیاباتیک دما گفته می‌شود که در واقع تغییر شماره ۵۱ - سال ۱۳۸۳

باشد. آن سوی اختلاط اولیه، ناحیه فیلد دور یا مکانیسم دوم نامیده می‌شود که در این مرحله فاضلاب تحت تأثیر جریانات آب محیطی است و به وسیله آن انتقال می‌یابد و ترقیق نیز در اثر پخش آلاینده با آب دریا انجام می‌شود. این عمل ممکن است در عرض ۱ تا ۲۰ ساعت در فاصله ۱۰۰ متر تا ۱۰ کیلومتر انجام شود. به طور کلی مکانیسم ترقیق در اختلاط اولیه و فیلد دور به شدت با هم اختلاف دارند به همین دلیل است که این دو ناحیه به طور جداگانه عمل تصفیه را انجام می‌دهند. مکانیسم سوم؛ دوره طولانی جریان نامیده می‌شود که این مکانیسم نیز شبیه مرحله دوم تحت تأثیر پارامترها و خصوصیات دریایی است که آلاینده‌های فاضلاب تحت مکانیسم ته‌نشینی و زیر و رو شدن در عرض ۱ تا ۱۰۰ روز در فاصله ۱۰ تا ۱۰۰ کیلومتر اتفاق می‌افتد [۱].

روش تحقیق

در این مطالعه سعی شده است از جدیدترین منابع برای معرفی تخلیه به دریا به عنوان یک گزینه برتر نسبت به سایر روش‌های تصفیه فاضلاب در شهرهای ساحلی استفاده گردد و طراحی این روش با توجه به خصوصیات و پارامترهای مختلف دریایی از قبیل درجه حرارت، شوری، دانسیته، میزان جریان و جهت آن، وجود و عدم وجود لایه‌بندی و پایداری و ... از طریق معادلات پیچیده ریاضی انجام شود. به علاوه، معادلات ترقیق و از بین رفتن باکتری‌ها در آب دریا نیز مرور گردیده است.

بحث و نتایج

به منظور شناخت و طراحی فاضلاب‌روها موارد زیر به طور خلاصه مورد بحث قرار می‌گیرد:

پایداری، شاخص پایداری و ارتباط آن با اختلاط

قبل از طراحی، شناخت شاخص پایداری و ارتباط آن با توربولانس ضروری است. در آلودگی دریا و

توربولانس است. در مواقع $E=0$ حالت طبیعی است. از دیگر شاخص پایداری آب دریا شاخص فرکانس بویانسی یا ارشمیدسی (N^2) است که توسط برون-ت-والسلا^۲ ابداع شد که به صورت رابطه (۱۱) است.

$$N^2 = gE = g \left(-\frac{1}{\rho} \frac{\partial \sigma T}{\partial Z} \right) \quad (11)$$

در صورتی که سیستم پایدار باشد، در مقابل توربولانس مقاومت نشان می‌دهد. به عبارت دیگر، انرژی توربولانس را مستهلک می‌کند. در این حالت در اعماق پائینی دریا، آب سنگین و در لایه‌های سطحی دریا آب سبک است.

بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که لایه‌بندی حرارتی هم به عنوان یک نیروی ضعیف کننده و هم تشدید کننده عمل می‌کند. اگر سیستم پایدار باشد ($E>0$)، لایه‌بندی حرارتی در مقابل توربولانس مقاومت می‌کند و انرژی توربولانس را مستهلک کرده و به عنوان نیروی کاهنده عمل می‌کند و اگر سیستم پایداری بیشتری داشته باشد حتی ممکن است در حضور جریان نیز توربولانس اتفاق نیفتد. در این حالت اختلاط کمتر اتفاق می‌افتد و پخش و ترقیق آلاینده با آب محیطی کمتر رخ می‌دهد. بر عکس اگر سیستم ناپایدار باشد ($E<0$)، توربولانس را تشدید کرده و باعث اختلاط و پخش بسیار شدید می‌شود؛ که این حالت در مواقعی اتفاق می‌افتد که لایه‌بندی حرارتی وجود ندارد و یا این که ضعیف است. در فصول پاییز و زمستان چون سطح آب سرد و سنگین می‌شود به طرف پایین حرکت کرده در نتیجه لایه‌بندی حرارتی را از بین برده که این امر باعث اختلاط و پخش بهتر آلاینده‌ها با آب محیطی می‌شود [۱، ۸ و ۹].

پس در حالت کلی می‌توان گفت که شاخص توربولانس در واقع گرادیان سرعت در آب دریا (du/dz) است که در سرعت یکنواخت توربولانس

درجه حرارت با عمق ناشی از تغییر فشار است و مقدار آن مثبت می‌باشد، که :

$$(4)$$

$$\delta t = -\Gamma \delta z$$

در اثر اختلاف دانسیته‌های متفاوت لایه‌های آب دریا نیروی ارشمیدسی یا بویانسی وارد عمل شده، به طوری که اگر حجم بسته آب را δv_2 در نظر بگیریم نیروی وارده بر این بسته آب، نیروی وزن و ارشمیدسی می‌باشند که براین دو نیرو می‌شود

$$(5)$$

$$P = f_B - f_B \quad (6)$$

$$F = \delta v_2 \rho_2 g - S V_2 P g$$

در نهایت فرمول شاخص پایداری (E) به وسیله هسن برگ^۱ به شکل زیر تعریف شد

$$E = -\frac{1}{\rho} \left[\frac{\partial \rho}{\partial S} \frac{\partial S}{\partial Z} + \frac{\partial \rho}{\partial T} \left(\frac{\partial T}{\partial Z} + \Gamma \right) \right] \quad (7)$$

واحد پایداری m^{-1} می‌باشد که با توجه به فرضیات هسن برگ خلاصه رابطه به شکل زیر است :

$$(8)$$

$$E = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \sigma T}{\partial Z}$$

از طرفی زیگمای T (σT) برابر است با :

$$(9)$$

$$\sigma T = [\rho(S, T, 0) - 1000]$$

که ρ جرم حجمی آب دریا، S شوری و T دمای آب و صفر یعنی در فشار یک اتمسفر است.

به عبارت دیگر شاخص پایداری (E) برابر است با

$$(10)$$

$$E = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial Z}$$

در صورتی که $E>0$ باشد، سیستم پایدار است؛ یعنی اختلاط عمودی اتفاق نمی‌افتد و تضعیف کننده توربولانس است. اگر $E<0$ باشد، سیستم ناپایدار است؛ در نتیجه اختلاط عمودی رخ داده و تشدید کننده

² Brunt-Valswla

¹ Hessen berg

فاصله مشخص بر روی آن تعبیه شده است، طراحی می‌گردد. در حالت T شکل، لوله‌ها به صورتی در زیر بستر دریا دفن می‌شوند که فقط دیفیوزرهای T شکل بر روی کف بستر دریا مشخص هستند. در صورتی که فاصله دیفیوزرها از حدی کمتر شود، پلوم‌ها به هم می‌رسند و به این حالت پلوم خطی گویند، ولی اگر فاصله دیفیوزرها از یک حدی بیشتر شوند، پلوم‌ها به هم نمی‌رسند و به تنهایی پخش می‌شوند که به این حالت پلوم منفرد گفته می‌شود [۱، ۴ و ۵].

شکل ۲ خروج یک پلوم از دیفیوزر در اعماق دریا را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌گردد، جریان آب دریا با سرعت U در حال حرکت است؛ به طوری که بر روی فاضلاب خروجی از دیفیوزر تأثیر می‌گذارد. از پارامترهای مهم سرعت جریان، مقدار و جهت آن است [۱].

فاضلابی که از طریق دیفیوزر خارج می‌شود، تحت تأثیر نیروهای شناوری و سرعتی (ممتوم) بیرون می‌آید و در فاصله‌ای پلوم‌ها یکی شده و با آب محیطی (دریا) مخلوط می‌گردد. ممکن است دانسیته پلوم فاضلاب در حین خروج از دیفیوزر در قسمتی از عمق دریا، با دانسیته آب دریا یکی گردد که این حالت در مواقع لایه‌بندی آب دریا به وجود می‌آید. در این حالت پلوم در همان نقطه ثابت مانده و حرکت عمودی نمی‌کند بلکه به طور افقی حرکت می‌کند که به این حالت گویند. در صورت فقدان لایه‌بندی، پلوم فاضلاب به سطح دریا می‌رسد. در شکل ۲، Xi ناحیه‌ای از اختلاط اولیه را نشان می‌دهد که با فاصله از دیفیوزر عرض میدان اختلاط بیشتر

اتفاق نمی‌افتد و عامل مقاومت در برابر آن پایداری است که شاخص آن E و N^2 می‌باشد.

مفهوم اختلاط اولیه فاضلاب در دریا

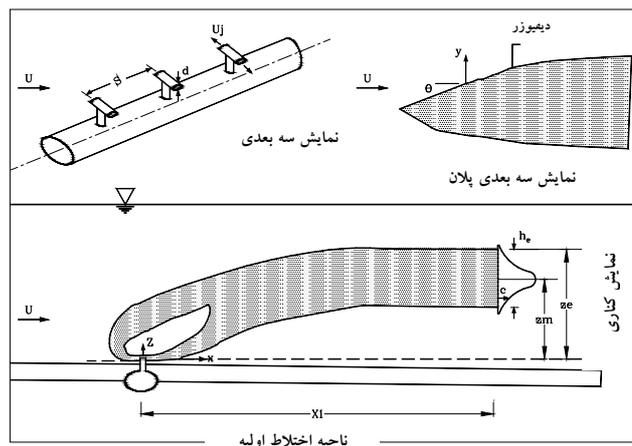
همان‌گونه که قبلاً اشاره شد، اختلاط اولیه در هنگام ورود فاضلاب از طریق این روش به داخل آب دریا در اثر نیروی شناوری و ممتوم صورت می‌گیرد. مقیاس طولی اختلاط اولیه از ۱۰ تا ۱۰۰۰ متر و مقیاس زمانی آن از ۱ تا ۱۰ دقیقه می‌باشد. اختلاط اولیه تحت کنترل مهندس طراح است. عامل مهم در اختلاط اولیه فاضلاب با آب محیطی، لایه‌بندی حرارتی است که در صورت وجود آن در نقطه، تخلیه پلوم فاضلاب به سطح دریا نمی‌رسد. در صورت عدم وجود لایه‌بندی حرارتی و یا لایه‌بندی ضعیف، پلوم فاضلاب در نقطه تخلیه با یک طراحی مناسب به سطح آب دریا رسیده که این عمل باعث اختلاط و ترقیق بیشتر و در نهایت تصفیه بهتر فاضلاب شده و پلوم تحت تأثیر اشعه ماورای بنفش نور خورشید گندزدایی می‌گردد [۱ و ۴].

مکانیسم جریان در اختلاط اولیه

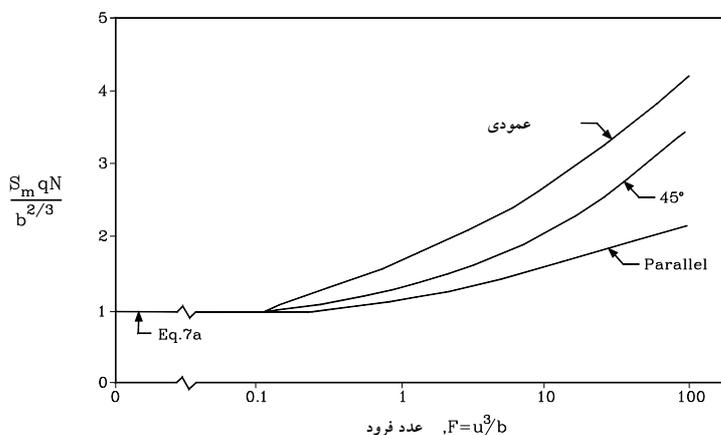
مقدمه

اختلاط اولیه که تحت کنترل مهندس طراح است با طراحی مناسب، فاضلاب تحت تأثیر دو نیروی شناوری و ممتوم از فاضلابرو خارج شده و در نهایت وارد دریا می‌گردد. بهتر است که فاضلاب از یک نقطه خارج نشود بلکه از چند نقطه توسط دیفیوزر خارج گردد.

فاضلابرو یا به شکل ساده همراه با سوراخ‌هایی با فاصله مشخص که بر روی زمین کار گذاشته می‌شود، آب و فاضلاب و یا به شکل لوله‌هایی که دیفیوزرهای T شکل با



شکل ۲- خروج پلوم فاضلاب از دیفیوزر به داخل آب دریا همراه با پارامترهای دریایی [۱]



شکل ۳- حداقل ترفیق اولیه فاضلاب با آب دریا در محیط لایه بندی براساس اعداد فرود مختلف

- فاصله دیفیوزرها از هم (S) بر حسب (m)
- دبی فاضلاب خروجی در واحد طول دیفیوزر (q) بر حسب (m²/S)

(۱۲)

$$q = \frac{Q}{L}$$

- فلاکس یا شار ممتوم (m) بر حسب (m³/S²)

(۱۳)

$$m = q \cdot U_j$$

که U_j سرعت بر حسب متر بر ثانیه است.

- فلاکس یا شار شناوری (b) بر حسب (m³/S³)

(۱۴)

$$b = q \cdot g'_0$$

شده و حتی ممکن است بر اثر نیروی شناوری، پلوم از سطح آب دریا نیز فراتر رود. Ze ارتفاع بالابری پلوم فاضلاب و h_e ضخامت پلوم را نشان می‌دهد [۱ و ۸].

پارامترهای جریان آب دریا

رفتار فاضلاب خروجی به دو پارامتر دریایی (که تحت کنترل طراح نیست) و پارامتر دیفیوزری (که تحت کنترل طراح است) بستگی دارد. از مهم‌ترین پارامترهای دریایی، لایه بندی و سرعت جریان دریایی (مقدار و جهت جریان) می‌باشد. همان طور که قبلاً گفته شد شاخص پایداری آب دریا N^2 است. از طرفی از مهم‌ترین پارامترهای دیفیوزر که تحت کنترل طراح است عبارتند از:

که g'_0 شتاب ویژه بر حسب متر بر مجذور ثانیه است طبق رابطه ۱۵ است:

$$(15)$$

$$g'_0 = g(\rho_a - \rho_0) / \rho_a$$

ρ_a دانسیته آب دریا و ρ_0 دانسیته فاضلاب و g شتاب ثقل است.

رابرت و رایت در سال ۱۹۸۹ شاخص شناوری را با Lb و شاخص ممتوم را با Lm بیان کردند:

$$Lm = m / b^{2/3} \quad (16)$$

$$Lb = b^{1/3} / N$$

نسبت Lm/Lb اهمیت ممتوم را نشان می‌دهد.

از طرفی نسبت S/Lb اهمیت فاصله دبی مجرای دیفیوزر را نشان می‌دهد. عدد فرود (F) که به نام شاخص سرعت محیطی (آب دریا) است برابر است با

$$(17)$$

$$F = U^3 / b$$

بنابراین با توجه به مطالب فوق رابطه کلی به صورت زیر توسط رابرت و سنیدر در سال ۱۹۸۹ بیان شد:

$$(18)$$

$$\frac{Ze}{Lb}, \frac{he}{Lb}, \frac{Sm.qN}{b^3} = f\left(\frac{Lm}{Lb}, \frac{S}{Lb}, F, \theta\right)$$

که Sm همان ترقیق است و با توجه به شکل ۲، Ze ارتفاع بالابری پلوم و θ زاویه جریان، F عدد فرود و he ضخامت پلوم است که بسته به حالات خاص شکل رابطه کلی عوض می‌شود.

تخلیه فاضلاب به شکل پلوم خطی به آب دریای لایه‌بندی شده

پلوم خطی در حالتی اتفاق می‌افتد که فاصله دیفیوزرها از حدودی کمتر باشد. در این حالت ممتوم نیز کاهش می‌یابد؛ یعنی: $Lm/Lb < 0.2$ و $S/Lb < 0.3$

بنابراین رابطه کلی به شکل رابطه زیر بیان می‌گردد

:

$$(19)$$

$$\frac{Ze}{Lb}, \frac{he}{Lb}, \frac{Sm.qN}{b^3} = f(F, \theta)$$

همان طور که در رابطه فوق ملاحظه می‌گردد از ارتفاع بالابری (Ze) و ضخامت پلوم (he) به دلیل کوچکی صرف نظر می‌شود. یعنی با افزایش سرعت جریان عدد فرود زیاد می‌گردد، در نتیجه ارتفاع بالابری و ضخامت پلوم کاهش می‌یابد. شکل ۳ حداقل ترقیق اولیه فاضلاب با آب دریا با مقادیر مختلف عدد فرود را نشان می‌دهد. در این شکل با افزایش عدد فرود میزان ترقیق نیز افزایش می‌یابد. شکل ۴ ارتفاع بالابری فاضلاب از خط دیفیوزر در یک جریان لایه‌بندی را نشان می‌دهد. در این شکل با افزایش عدد فرود، ارتفاع بالابری فاضلاب کاهش می‌یابد.

رابرت و همکارانش ثابت کردند که زمان اختلاط اولیه (T_i) تابعی از شاخص فرکانس بویانسی (N^2) است به طوری که T_i برابر است با

$$(20)$$

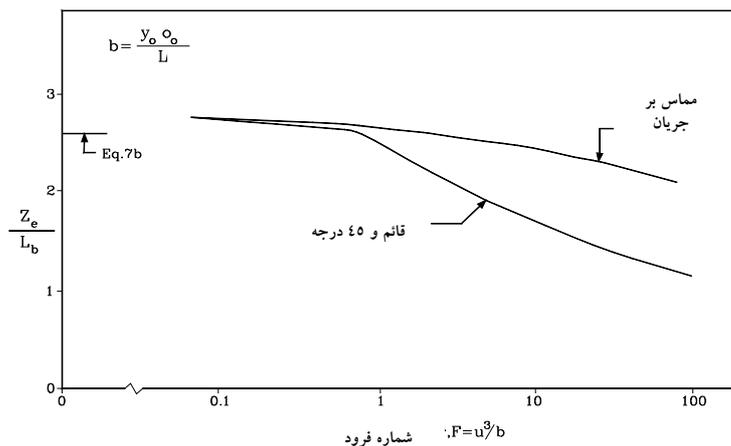
$$T_i = 8/5 N^{-1}$$

سپس با استفاده از T_i ، فاصله اختلاط یا طول منطقه اختلاط اولیه (X_i) محاسبه می‌شود

$$(21)$$

$$X_i = 8/5 U.N^{-1}$$

این رابطه برای مواقعی کاربرد دارد که عدد فرود بزرگ‌تر از ۰/۱ باشد ($F > 0.1$)



شکل ۴- ارتفاع بالابری فاضلاب از دیفیوزر در آب دریا لایه بندی شده

(۲۳)

$$\frac{Z_e}{L_b} \frac{h_e}{L_b} \frac{S m \cdot q N}{b^3} = f\left(\frac{S}{L_b}\right)$$

رایت و وانگ در سال ۱۹۸۸ رابطه زیر را در این حالت به دست آوردند:

$$\frac{Z_e}{L_b} = 4 \quad \text{و} \quad \frac{h_e}{L_b} = 1/7 \quad (۲۴)$$

$$L_b = \frac{B^{1/4}}{N^{3/4}}$$

Q_j دبی کل تخلیه و B فلاکس شناوری که معادل $g_0 \cdot Q_j$ است. این روابط برای رژیم پلومی کاربرد دارد که L_m و L_b برابرند با:

$$L_m = \frac{M^{3/4}}{B^{1/2}} \quad (۲۵)$$

$$L_b = \frac{B^{1/4}}{N^{3/4}}$$

که M فلاکس ممتوم است و برابر با $U_j \cdot Q_j$ می باشد.

اثر شار یا فلاکس ممتوم

اگر نسبت L_m/L_b کمتر از ۰/۲ باشد، جریان فاضلاب خروجی از دیفیوزر به شکل پلوم عمل کرده و اثر ممتوم حذف و ارتفاع بالابری پلوم کمتر می گردد. به طور کلی اگر جریان آب عمود بر دیفیوزر

مهندس طراح بایستی تخلیه را در بحرانی ترین حالت یعنی هنگامی که سرعت جریان دریایی صفر ($U=0$) است، طراحی نماید. در این حالت از عدد فرود (F) و جهت جریان (θ) صرف نظر می گردد و رابطه کلی به شکل زیر می شود

(۲۲)

$$\frac{S m \cdot q N}{b^3} = 0.97$$

در این حالت $\frac{Z_e}{L_b} = 2.6$ و $\frac{h_e}{L_b} = 1/8$ می شود یعنی حدود ۷۰٪ ارتفاع بالابری را ضخامت پلوم تشکیل می دهد.

اثر محل قرار گرفتن دیفیوزر

اگر فاصله بین دیفیوزرها (S) در انتهای لوله تخلیه زیاد باشد، رفتار تخلیه فاضلاب به داخل دریا تغییر می کند و اگر از حدی بیشتر شود، از حالت پلوم خطی خارج شده و به شکل پلوم منفرد در می آید. در این حالت پلوم های فاضلاب خروجی مستقل از هم می باشند و بین آنها تداخل به وجود نمی آید. به عبارت دیگر $\frac{S}{L_b} > 1$ است و رابطه کلی در این حالت به شکل زیر بیان می گردد:

جزئیات طرح را بایستی در کتاب و مقالات فیشتر جستجو کرد، اما ملاحظات طرح به طور خلاصه به شرح ذیل است [۱۰]:

الف) از نفوذ آب دریا به داخل فاضلابرها جلوگیری به عمل آید. برای این کار بایستی سرعت جریان خروجی فاضلاب از فاضلابرها از حدی بالاتر باشد، یعنی عدد فرود بیش از ۱ باشد.

$$F_j = \frac{U_j}{\sqrt{g'_0 d}}$$

که U_j سرعت در روزنه خروجی آفتال و d قطر روزنه است.

ب) تعداد روزنه خروجی فاضلاب ضرب در سطح آن بایستی کوچکتر از سطح مقطع لوله اصلی تخلیه فاضلاب باشد، یعنی $n A_j < A$

که A_j سطح هر روزنه و A سطح مقطع لوله اصلی تخلیه و n تعداد روزنه بر روی لوله است [۱].

پ) نظر به این که در طول شبانه روز تغییرات جریان فاضلاب وجود دارد، به منظور جلوگیری از رسوب مواد جامد فاضلاب در داخل لوله‌ها، حداقل سرعت خود شست و شو باید تأمین گردد. پیشنهاد می‌شود این سرعت بین ۰/۵ تا ۱ متر بر ثانیه باشد. ت) افت فشار در لوله، می‌نیمم مقدار باشد تا هزینه پمپاژ به کمترین مقدار برسد.

ث) توزیع جریان در روزنه‌های مختلف لوله یکسان باشد. برای این کار پیشنهاد می‌شود در انتهای دیفیوزرها که افت فشار زیاد است، دهانه روزنه‌ها را افزایش دهند [۱ و ۱۰].

طول دیفیوزر

همان گونه که قبلاً اشاره شد، طراحی فاضلابرها را برای بحرانی‌ترین شرایط یعنی در حالتی که لایه‌بندی حرارتی در غیاب جریان‌ات دریایی ($U=0$) وجود داشته باشد، انجام می‌دهند. رابرت رابطه زیر را

تخلیه فاضلاب باشد، اثر ممتوم کاهش یافته و بالابری فاضلاب کم می‌شود [۱].

به سطح آمدن فاضلاب

همان طور که قبلاً اشاره شد در صورت فقدان لایه‌بندی و یا لایه‌بندی ضعیف در دریا، فلوم با طراحی مناسب به سطح دریا می‌رسد. به عبارت دیگر پدیده Surface waste field رخ می‌دهد. در این حالت، حداکثر ترقیق و اختلاط اتفاق می‌افتد و ارتفاع بالابری فاضلاب برابر عمق دریا است.

فیشتر در سال ۱۹۷۹ رابطه زیر را با شرط این که لایه‌بندی حرارتی در دریا نباشد و سرعت جریان صفر باشد، به عبارت دیگر سیستم هموژن باشد، به دست آورد:

(۲۶)

$$S_m = 0.38b^{1/3} q^{-1} H$$

$$= 0.38(g'_0)^{1/3} Q^{-2/3} L^{2/3} H$$

که S_m ترقیق فاضلاب با آب دریا است. در این حالت یعنی موقعی که لایه‌بندی نباشد، ترقیق متناسب با سرعت جریان ($S_m \propto U$) است ولی در صورت وجود لایه‌بندی این تناسب به شکل $S_m \propto U^{1/2}$ است [۱ و ۳].

طراحی دیفیوزر به منظور اختلاط اولیه فاضلاب با آب دریا

همان طور که قبلاً اشاره شد، طراحی بستگی به شرایط محلی، کیفیت آب محلی، شرایط دریایی و شرایط ساخت دارد. اما به طور کلی یک حالت نمونه توسط رابرت طراحی گردید.

هیدرولیک دیفیوزر

انتقال افقی و پخش به وسیله رژیم جریان محلی و پخش گردابی (اختلاط جانبی به علت جریانات گردابی) صورت می‌پذیرد.

بروکس در سال ۱۹۶۰ مدل پخش افقی را گسترش داد. یک نمونه از این مدل در از بین رفتن باکتری‌ها در این روش به شکل زیر است:

$$S_b = \log T/T_{90}$$

$S_b =$ ترقیق کلیفرم و $T =$ زمان انتقال فاضلاب به نواحی حفاظت شده مثل ساحل‌ها به ساعت و $T_{90} =$ زمان مورد نیاز برای از بین رفتن ۹۰٪ کلیفرم‌ها به ساعت است.

لودویگ در سال ۱۹۸۸ به طور نمونه‌وار مقادیر T_{90} را گردآوری کرد که در جدول ۲ آمده است:

جدول ۲- میزان T_{90} در مکان‌های مختلف

محل T_{90}	زمان (ساعت)
هونولولو	۰/۷۵ یا کمتر
پورتوریکو	۰/۷
ریودوژانیرو-برزیل	۱
نایس-فرانسه	۱/۱
آکرا-غنا	۱/۳
موتویدو-اروگوئه	۱/۵
سانتوز-برزیل	۰/۸-۱/۷

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

با توجه به مطالب فوق‌الذکر نتیجه می‌گیریم که دفع فاضلاب خام شهری و صنعتی از نوع آلی قابل تجزیه و یا خروجی تصفیه مقدماتی را می‌توان از طریق سیستم دفع فاضلاب به روش تخلیه به دریا در شهرهای ساحلی کشور یعنی استان‌های شمالی و جنوبی کشور همانند سایر شهرهای جهان اجرا کرد. طبق نظر بسیاری از محققان از جمله رابرت و وود این روش، نسبت به سایر روش‌های تصفیه ثانویه فاضلاب دارای مزایای فراوان از جمله فاقد هزینه زمین، نگهداری، بهره‌برداری، تعمیر و نیروی انسانی بوده و مشکل دفع لجن را نیز ندارد [۱ و ۳]

برای این حالت برای تعیین طول دیفیوزر به دست آورد:

$$(27)$$

$$S_m = 0.97(g'_0)^{\frac{2}{3}} q^{\frac{-1}{3}} N^{-1}$$

$$= 0.97(g'_0)^{\frac{2}{3}} Q^{\frac{-1}{3}} L^{\frac{1}{3}} N^{-1}$$

که L طول دیفیوزر بر حسب متر است. ارتفاع بالابری فاضلاب خروجی از لوله (Ze) از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$(28)$$

$$Ze = 2.6(g'_0)^{\frac{1}{3}} q^{\frac{1}{3}} N^{-1}$$

$$= 2.6(g'_0)^{\frac{1}{3}} Q^{\frac{1}{3}} L^{\frac{1}{3}} N^{-1}$$

همان طور که در روابط بالا مشاهده می‌شود، در صورت بالا بودن لایه‌بندی یا شاخص پایداری، ترقیق فاضلاب با آب محیطی (S_m) کاهش یافته و ارتفاع بالابری (Ze) نیز کاهش می‌یابد. اگر طول دیفیوزر (L) کاهش یابد، دبی در واحد طول (q) کم می‌شود و میزان ترقیق فاضلاب با آب دریا زیاد شده و ارتفاع بالابری فاضلاب نیز افزایش می‌یابد [۱ و ۲].

زوال باکتری‌ها در دریا

به طور کلی ترقیق باکتری‌ها و به عبارت دیگر از بین رفتن باکتری‌ها به ویژه باکتری‌های شاخص از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$(29) \quad \text{آب و فاضلاب}$$

$$S_T = S_i \times S_h \times S_b = C_0 / C_t$$

$S_T =$ ترقیق کل

$S_i =$ ترقیق اولیه

$S_b =$ ناپدید شدن کلیفرم (ترقیق کلیفرم)

$S_h =$ (ترقیق افقی)

$C_0 =$ غلظت اولیه کلیفرم در فاضلاب

$C_t =$ غلظت کلیفرم بعد از ساعت T (بر روی سواحل)

C_t

پیشنهاد می‌گردد برای اجرای این روش در شهرهای ساحلی مطالعات جامع دریایی توسط تیم با تجربه در دریای خزر و خلیج فارس صورت گیرد. این روش قابل اجرا برای تمام کشورهای ساحلی دریای خزر و دریای عمان می‌باشد.

- 1- Philips, J.W. and Roberts., (1990). *"Outfall Design Considerations"*, School of Civil Engineering, Georgia Institute of Technology, Atlanta, Georgia.
- 2- Metcalf and Eddy, (2001). *"Wastewater Engineering, Treatment, Reuse and Disposal"*, McGraw-Hill Inc.
- 3- Wood., I.R., and Bel. R.G., (1993). *"Ocean Disposal of Wastewater."*
- 4- Muellenhoff, W.P., Soldate, Jr. D. and et al., (1985). *" Initial Mixing Characteristics of Municipal Ocean Discharge"*, Report EPA/600/3-85/073. USEPA, Washington.
- 5- Roberts, P.J.W., (1980). *"Ocean Outfall Dilution : Effects of Currents"*, J. Hydraulics. (HY5). 769-782. vol. No.,
- 6- Roberts, P.J.W., (1989). *"Dilution and Transport Predictions for Ocean Outfall "*, Water. Sci. Tech., vol. 21, pp: 969-979.
- 7- Roberts, P.J.W., (1988). *"Ocean Outfall System for Dense and Buoyant Effluent"*, J. Environmental Engineering, vol. 114, pp: 1175-1191.
- 8- Wong, D.R. and Wright, S.J., (1988). *"Submerged Turbulent Jets in Stagnant linearly Stratified Fluids"*, J. Hydraulics Rec., vol. 26, No. 2, pp: 199-223.
- 9- Wright, S.J. and Wong, K.E. (1982). *"Outfall Diffuser Behavior in Stratified Ambient Fluid"*, J. Hydraulics, ASCE., vol. 108 (HY4), pp: 483-501.
- 10- Fisher, H.B.E. and et al., (1979). *"Mixing in Inland and Coastal Water"*, Academic Press. New York.
- 11- Brooks, N.H., (1988). *"Seawater Intrusion and Purging in Tunneled Outfall"*, Schweizer Ingenious und Architect. vol. 106.No. 6., pp: 56-160.