

راهنمای عملی تعیین مشخصات فنی، نصب و بهره برداری از سیستم های هوادهی عمقی:

دیفیوزرهای حباب ریز و حباب درشت

تهیه شده در:

بخش تحقیق و توسعه

شرکت فنی و مهندسی آریا بهین تصفیه



مقدمه:

طیف گسترده‌ای از تجهیزات که به طور ویژه برای انتقال، مدیریت و تصفیه فاضلاب طراحی شده‌اند در دسترس است. هدف از ارائه این تجهیزات، تأمین سیستمی بادوام، مقرون به صرفه، کم مصرف از نظر انرژی و با عملکردی مطمئن و بدون مشکل است.

این کتابچه، انواع مختلف سیستم‌های هوادهی دیفیوزری (Diffused Aeration Systems) ارائه شده را بر اساس انواع دیفیوزرهای موجود که در شکل ۱ نشان داده شده‌اند، تشریح می‌کند:

۱. دیفیوزر دیسکی حباب ریز (Fine Bubble Disc Diffusers)
۲. دیفیوزر دیسکی حباب درشت (Coarse Bubble Disc Diffusers)
۳. دیفیوزر لوله‌ای حباب ریز (Fine Bubble Tube Diffusers)
۴. دیفیوزر لوله‌ای حباب درشت (Coarse Bubble Tube Diffusers)



شکل ۱. انواع دیفیوزر

کاربرد:

سیستم‌های هوادهی دیفیوزری (Diffused Aeration Systems) معمولاً در تصفیه فاضلاب برای دو هدف اصلی به کار می‌روند:

- تأمین اکسیژن مورد نیاز برای واکنش‌های بیولوژیکی
- ایجاد اختلاط (Mixing) در شرایطی که انتقال اکسیژن اولویت اصلی نیست.

کاربردهای متداول سیستم‌های دیفیوزر دیسکی و لوله‌ای شامل موارد زیر است:

- حوضچه‌های فرایند بیولوژیکی
- هوادهی لجن
- حوضچه‌های متعادل‌سازی (Equalization Tanks)
- حوضچه‌های دانه‌گیر (Grit Traps)
- سایر فرایندهایی که نیاز به تأمین هوا دارند.

علاوه بر این، برخی شرکت‌ها قادر هستند سیستم‌های کامل و بهینه هوادهی را نیز ارائه نمایند؛ به این صورت که در طراحی و انتخاب ایستگاه دمنده (Blower) یا کمپرسور پشتیبانی فنی ارائه می‌کنند. فلسفه طراحی سیستم‌های هوادهی بر بهینه‌سازی کل سامانه هوادهی استوار است که شامل انتخاب مناسب دمنده‌ها نیز می‌شود تا بیشترین بهره‌وری انرژی در عملکرد سیستم فراهم گردد.

دامنه محصولات

دامنه محصولات ارائه‌شده متنوع می‌باشد. سیستم‌های کامل هوادهی دیفیوژری بسته به هر پروژه از نظر تعداد دیفیوژرها، اندازه و شکل سیستم متفاوت خواهند بود.

۲,۱ انتخاب جنس غشا (Selection of Membrane Material)

غشای دیفیوژر بشکل مواد مختلفی قابل ارائه است. در بیشتر موارد، EPDM انتخاب مناسبی برای تصفیه فاضلاب شهری محسوب می‌شود؛ در حالی که برای فاضلاب‌های صنعتی ممکن است استفاده از مواد غشایی دیگر مد نظر قرار گیرد.

به طور کلی، در سیستم‌های هوادهی، انتخاب غشای مناسب برای کاربرد مورد نظر بر اساس اطلاعات ارائه‌شده درباره ویژگی‌های فاضلاب ارزیابی و تعیین می‌شود.

۳. انتخاب و سایزینگ محصول (Product Selection and Sizing)

شرکت‌ها می‌توانند دیفیوژرها را به صورت بخشی از یک سیستم کامل هوادهی دیفیوژری، یا به عنوان دیفیوژرهای تکی جهت تعمیرات و جایگزینی در سیستم‌های موجود، ارائه نمایند.

۳,۱ انتخاب و سایزینگ (Selection and Sizing)

انتخاب و سایزینگ یک سیستم هوادهی، فرآیندی تخصصی است که نیازمند شناخت دقیق کاربرد، تجهیزات هوادهی و همچنین درک کامل از نحوه تعامل اجزای مختلف سیستم برای دستیابی به حداکثر راندمان انتقال اکسیژن می‌باشد.

سایزینگ سیستم هوادهی بر اساس نیاز اکسیژن تعیین شده توسط فرآیند انجام می‌شود.

نیاز اکسیژن فرآیند از طریق محاسبه موارد زیر تعیین می‌گردد:



- بار مواد آلی
- تنفس درون زاد لجن فعال (Endogenic Respiration)
- نرخ نیتریفیکاسیون فرآیند

سپس این نیاز اکسیژن به «نیاز استاندارد اکسیژن» یا SOR (Standard Oxygen Requirement) تبدیل می شود که مبنای محاسبه موارد زیر قرار می گیرد:

- دبی هوای مورد نیاز
- تعداد دیفیوزرهای مورد نیاز سیستم هوادهی

۳,۲ نحوه انتخاب و نصب دیفیوزری

برای انجام ساینزینگ نهایی، انتخاب و جانمایی تجهیزات، یا اصلاح تجهیزات انتخاب شده، می توان از پشتیبانی شرکت ها بهره مند شد. برای انتخاب مناسب ترین راهکار، لازم است اطلاعات مشخصی ارائه شود.

چک لیستی شامل اطلاعات کافی درباره سیستم هوادهی باید تهیه و تکمیل گردد، مهمترین مواردی که باید در این فرم قید شود عبارت است از :

- میزان نیاز اکسیژن به صورت:
 - SOR (Standard Oxygen Requirement)
 - AOR (Actual Oxygen Requirement) یا
- در صورت ارائه AOR، اطلاعات زیر نیز باید درج شود:
 - دمای آب
 - ارتفاع محل از سطح دریا
 - ضریب Alpha
 - ضریب Beta
 - غلظت (DO) اکسیژن محلول
- نوع فاضلاب
- هندسه مخزن
- نوع ترجیحی دیفیوزر دیسکی (Disc) یا لوله ای (Tube)
- نوع ترجیحی نصب ثابت (Fixed) یا متحرک / قابل بیرون کشیدن (Retractable)
- نوع ترجیحی جنس لوله ها
- نوع ترجیحی پایه یا ساپورت لوله ها
- دبی هوا، در صورت موجود بودن اطلاعات کمپرسورهای فعلی اطلاعات آن باید قید گردد.
- الزامات ویژه / اطلاعات تکمیلی
- علاوه بر این، باید نقشه ابعادی مخزن نیز ارائه شود.



پس از بررسی موارد فوق و محاسبات لازم سیستم پیشنهادی ارایه و شامل موارد زیر خواهد بود:

- محاسبات عملکرد سیستم
- پیشنهاداتی برای آرایش و جانمایی سیستم هوادهی

۳,۳ اطلاعات پایه برای سایزینگ (Background Information for Sizing)

یکی از پارامترهای اصلی برای مقایسه سیستم‌های هوادهی، «راندمان استاندارد هوادهی» یا (SAE) است که به صورت نرخ انتقال اکسیژن به مایع به ازای واحد توان مصرفی تعریف می‌شود (kgO_2/kWh). مقدار SAE به رابطه پیچیده میان سیستم و شرایط حاکم بر داخل و اطراف حوضچه وابسته است.

طراح سیستم می‌تواند تعدادی از پارامترها را برای دستیابی به شرایط بهینه هوادهی تنظیم کند. بطور مثال، بازسازی حوضچه‌های موجود مدنظر است؛ بنابراین عمق غوطه‌وری دیفیوزرها و نوع حوضچه از ابتدا مشخص می‌باشد. مهم‌ترین متغیرهایی که برای دستیابی به راندمان بالای انتقال اکسیژن قابل تنظیم هستند عبارت‌اند از:

- اندازه حباب (اندازه سوراخ‌های غشا)
- دبی هوای هر واحد (دبی عبوری از هر دیفیوزر)
- سطح فعال دیفیوزر (تعداد دیفیوزرها)

اندازه حباب (Bubble Size)

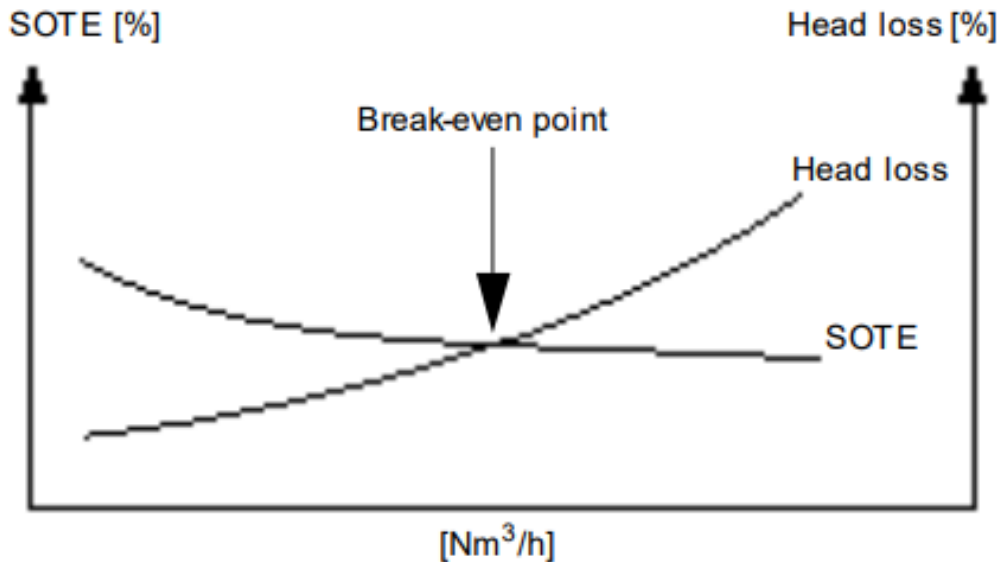
عامل کلیدی در انتقال مؤثر اکسیژن، سرعت صعود حباب‌های هوا و سطح تماس هوا/مایع است. این دو عامل تعیین می‌کنند چه میزان زمان و سطح تماس برای انتقال اکسیژن از حباب به مایع اطراف در دسترس باشد. اندازه حباب تأثیر قابل توجهی بر انتقال اکسیژن دارد؛ زیرا نسبت سطح تماس هوا به مایع مستقیماً بر نرخ انتقال اکسیژن اثرگذار است. با کاهش اندازه حباب، نسبت سطح تماس هوا/مایع افزایش یافته و در نتیجه نرخ انتقال اکسیژن به‌طور مؤثری بهبود می‌یابد. علاوه بر این، حباب‌های ریز دارای سرعت نهایی صعود کمتری هستند که باعث افزایش زمان در دسترس برای انتقال اکسیژن می‌شود.

دبی هوا و سطح فعال دیفیوزرها

(Airflow and Active Surface of Diffusers)

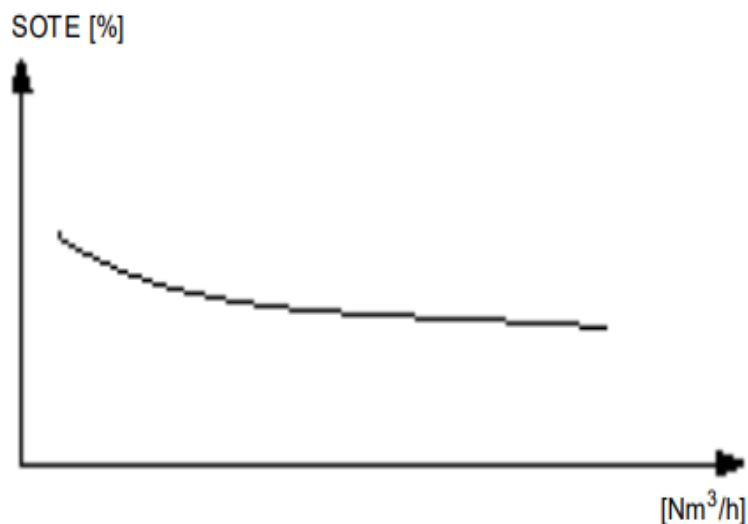
راندمان استاندارد انتقال اکسیژن (SOTE) با افزایش دبی هوای هر دیفیوزر کاهش می‌یابد (شکل ۲). در نتیجه، دبی بالای هوا در هر دیفیوزر مستقیماً باعث افزایش هزینه‌های بهره‌برداری خواهد شد. تأمین دبی هوای کافی برای فرآیند اکسیژن‌رسانی ضروری است، اما افزایش بیش از حد دبی هوا برای افزودن اکسیژن بیشتر، اثر منفی بر راندمان سیستم خواهد داشت. هرچه دبی هوا کمتر باشد، مصرف انرژی (kWh) نیز کمتر خواهد بود.

علاوه بر این، افت هد کل سیستم افزایش می‌یابد، زیرا فشار برگشتی ناشی از غشا با افزایش دبی هوا بیشتر می‌شود و این موضوع به افزایش توان مصرفی کمپرسور منجر خواهد شد.

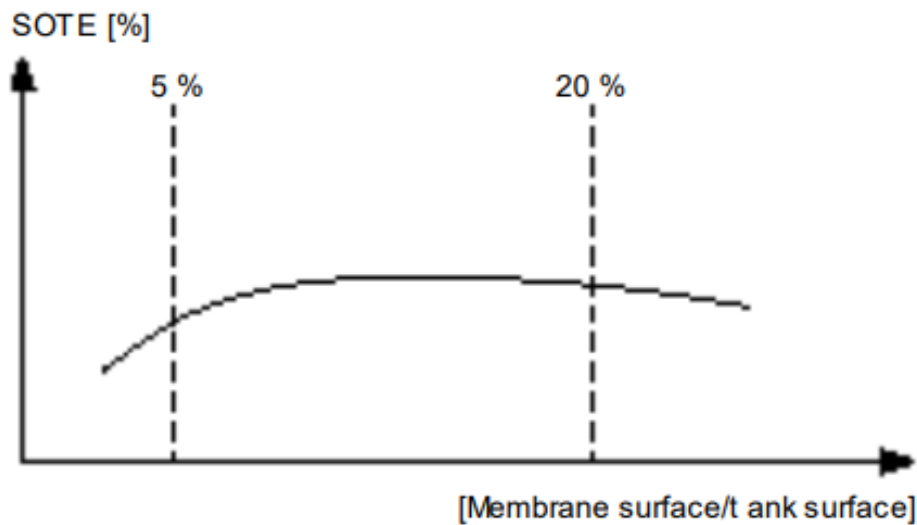


شکل ۲: راندمان استاندارد انتقال اکسیژن (SOTE) و افت هد به‌عنوان تابعی از دبی هوا در هر دیفیوزر

کاهش مقدار SOTE به این دلیل رخ می‌دهد که با افزایش دبی هوا، قطر حباب‌های هوا بزرگ‌تر شده و پدیده هم‌جوشی حباب‌ها (Bubble Coalescence) رخ می‌دهد. این موضوع در نهایت باعث کاهش راندمان انتقال اکسیژن می‌شود.



شکل ۳: SOTE به‌عنوان تابعی از دبی هوا در هر دیفیوزر



شکل ۴: SOTE به عنوان تابعی از تراکم دیفیوزرها (Diffuser Density)

برای دستیابی به راندمان بالای هوادهی، هدف باید افزایش سطح فعال دیفیوزرها باشد که منجر به کاهش دبی هوا در هر دیفیوزر می‌شود. افزایش تعداد دیفیوزرها موجب افزایش هزینه سرمایه‌گذاری اولیه (Capital Cost) می‌شود، اما این هزینه معمولاً به سرعت با کاهش هزینه‌های بهره‌برداری جبران می‌گردد. با این حال، افزایش تراکم دیفیوزرها بیش از حدود ۲۰٪ می‌تواند اثر معکوس بر راندمان داشته باشد، زیرا حباب‌ها شروع به ادغام شدن کرده و حباب‌های بزرگ‌تری تشکیل می‌دهند که باعث کاهش سطح تماس هوا با مایع می‌شود. این موضوع در شکل ۴ نشان داده شده است. تراکم بالاتر همچنین می‌تواند دسترسی به کف مخزن برای انجام تعمیرات را دشوار کند، زیرا فضای کافی برای فعالیت پرسنل نگهداری باقی نمی‌ماند. لازم به ذکر است که مقدار دقیق تراکم دیفیوزری که در آن SOTE کاهش می‌یابد، به نوع دیفیوزر بستگی دارد.

انتخاب صحیح مواد (Getting the Right Materials)

دمای هوای فشرده در یک سیستم هوادهی به طور تقریبی به میزان ۱۰ درجه سانتی‌گراد به ازای هر متر ستون آب (mwc) افزایش می‌یابد. این افزایش دما ناشی از عوامل زیر است:

- عمق غوطه‌وری دیفیوزرها
- لوله‌کشی و اتصالات
- فشار برگشتی در غشای دیفیوزر

در تأسیساتی با عمق زیاد مخزن و دمای محیط بالا، فشار لازم برای غلبه بر افت هد سیستم هوادهی می‌تواند باعث افزایش بسیار زیاد دمای هوا در خروجی کمپرسور شود. این دمای نسبتاً بالا سبب می‌شود که لوله‌کشی داخل حوضچه به جای uPVC متداول از مواد مقاوم‌تر در برابر حرارت مانند پلی‌پروپیلن (PP) یا فولاد ضدزنگ (Stainless Steel) ساخته



شود. اگرچه **PP** نسبت به **uPVC** هزینه بیشتری دارد، اما همچنان دوام بالایی داشته و در عین حال به مراتب اقتصادی تر از فولاد ضدزنگ است.

راهنمای کلی انتخاب ماده:

- **uPVC**: حداکثر دمای مجاز 70°C
- **PP**: حداکثر دمای مجاز 100°C
- **فولاد ضدزنگ**: برای دماهای بیش از 100°C

مدیریت میعانات (Dealing with Condensation)

هوای گرم موجود در سیستم به راحتی در شبکه هوادهی غوطه‌ور در آب تقطیر شده و آب در پایین ترین نقاط شبکه جمع می شود. تجمع آب در سیستم باعث:

- کاهش قطر مؤثر لوله
- افزایش افت هد
- افزایش هزینه های بهره برداری

برای حذف میعانات، سیستم تخلیه (**Purge System**) در پایین ترین نقاط شبکه هوادهی نصب می شود. با ایجاد شرایطی که افت هد در مسیر سیستم تخلیه کمتر از دیفیوزرها باشد، یک عملکرد ایرلیفت (**Airlift**) ایجاد می شود که آب تقطیر شده را از شبکه خارج می کند.

نقاط تخلیه سیستم Purge می توانند به دو شکل باشند:

- **سیستم دستی**: خروجی تخلیه در بالای سطح آب قرار دارد دارای شیر یا (Tap)
- **سیستم خودکار پیوسته**: خروجی در کف حوضچه قرار دارد

اگرچه سیستم دستی زمان بر است، اما استفاده ترکیبی از سیستم دستی و خودکار می تواند اطمینان بیشتری از تخلیه مداوم میعانات فراهم کرده و هزینه های بهره برداری را کاهش دهد. سیستم دستی این امکان را می دهد که آب تخلیه شده از سیستم لوله کشی هوا مشاهده شود:

- اگر آب خاکستری باشد، نشان دهنده آسیب سیستم دیفیوزر و ورود فاضلاب به سیستم هوا است.
- اگر آب شفاف باشد، مشخص می نماید که تنها آب تقطیر شده بوده و سیستم عملکرد صحیح داشته است.

۴. نصب (Installation)

برای اطلاعات دقیق‌تر درباره روش نصب، به دستورالعمل‌های نصب و بهره‌برداری دیفیوزرهای دیسکی و لوله‌ای مراجعه شود.

معمولاً در زمان تحویل یک سیستم کامل هوادهی دیفیوزری، یک نقشه ساخت از کل سیستم ارائه می‌شود که شامل موارد زیر است:

- نقشه کامل سیستم هوادهی دیفیوزری
- الزامات مونتاژ
- لیست قطعات و لوله‌ها

سیستم به صورت بخش‌بندی شده تحویل داده می‌شود و هر قطعه مطابق با لیست قطعات و لوله‌ها بسته‌بندی و شماره‌گذاری می‌گردد.

- شماره بسته (Package Number): مربوط به محموله ارسال شده
- کد قطعه (Code Number): مربوط به نقشه‌های مونتاژ

نمونه‌ای از نحوه دسته‌بندی بسته‌ها:

- بسته ۱ شامل بخش‌هایی مانند:
 - لوله عمودی انتقال هوا به شبکه توزیع دیفیوزری (Dropleg)
 - کلکتور توزیع (Manifold)
 - لوله‌های جانبی / توزیع فرعی (Lateral Piping)
- بسته ۲ شامل:
 - دیفیوزرها
- بسته ۳ شامل:
 - براکت‌ها یا پایه‌های نگهدارنده
 - سیستم تخلیه (Purge)
 - تجهیزات جانبی

هر بسته ممکن است شامل چند جعبه باشد.



شکل ۵. نمونه ای از بسته ها که حاوی لوله های افقی توزیع هوا در شبکه دیفیوژری است

۴,۱ نقشه های مونتاژ (Assembly Drawings)

نقشه های مونتاژ محل قرارگیری بخش های مختلف و الزامات نصب را نشان می دهند. این نقشه ها شامل دستورالعمل های زیر هستند:

- محل سوراخ کاری برای بولت های مهار (Anchor Bolts)
- دستورالعمل مونتاژ ساپورت ها
- دستورالعمل مونتاژ لوله ها
- دستورالعمل مونتاژ سیستم Purge
- نحوه اتصال دیفیوژرها
- شماره گذاری اجزا مانند پیچ ها و بولت ها برای شناسایی در لیست قطعات
- گشتاور مناسب برای سفت کردن اتصالات رزوه ای

۴,۲ لیست قطعات و لوله ها (Component and Pipe List)

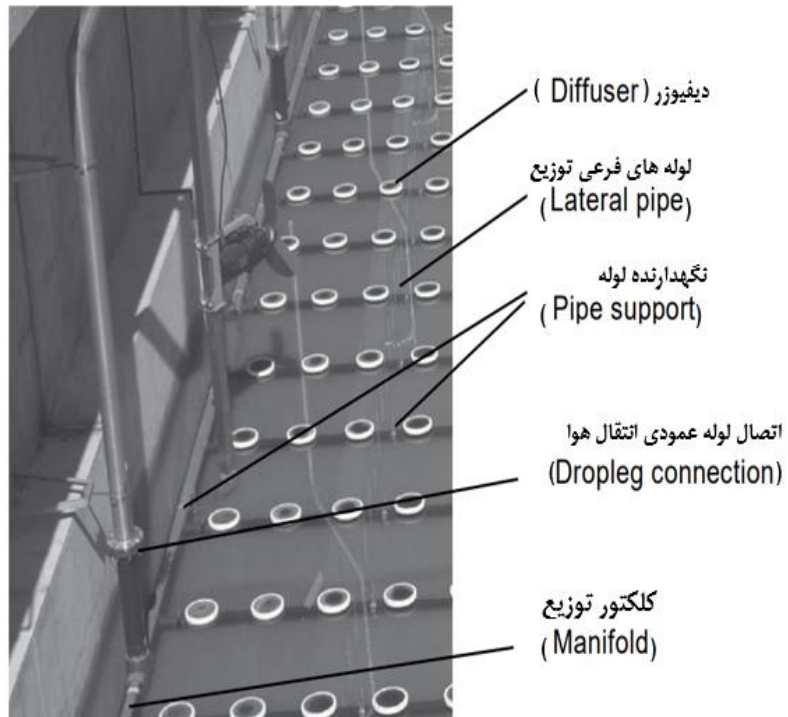
لیست قطعات و لوله ها به عنوان چک لیست تمام اجزای سیستم هوادهی دیفیوژری استفاده می شود.

این لیست شامل اطلاعات زیر است:

- **Code Number** (کد یکتایی که به دستورالعمل مونتاژ ارجاع می دهد).
- **Description** (شرح قطعه)
- **Quantity** (تعداد هر قطعه)
- **Package** (شماره بسته ای که قطعه در آن قرار دارد).

۵. شرح سیستم (System Description)

اجزای اصلی یک سیستم هوادهی در شکل ۶ نشان داده شده‌اند.



شکل ۶: اجزای اصلی یک سیستم هوادهی دیفیوزری



کانون تخصصی مهندسی محیط زیست و آب و فاضلاب
<https://ble.ir/specializedcenterofenvironmental>
@WASTEWATERQUIZ



۵،۱ سیستم ثابت (Fixed System)

سیستم ثابت، راهکار استاندارد محسوب می‌شود. در این حالت، سیستم هوادهی دیفیوزری بر روی کف مخزن فرآیندی نصب و پیچ می‌شود. بسته به محل لوله عمودی انتقال هوا (Dropleg)، شبکه هوادهی می‌تواند به گونه‌ای طراحی شود که حداکثر سطح کف مخزن را پوشش دهد.

بسته به کاربرد، لوله کشی می‌تواند از مواد مختلف ساخته شود، از جمله:

- PVC
- PP

- فولاد ضدزنگ

باید تمام مواد پلاستیکی مورد استفاده دارای گواهی کاربرد در شرایط فشار باشند. معمولاً PVC در شرایطی استفاده می‌شود که محدودیت خاصی از نظر دما ناشی از عمق زیاد مخزن وجود نداشته باشد. به طور معمول، در مخازن با عمق بیش از ۸ متر از PVC استفاده نمی‌شود.

در سیستم‌های ثابت، برای انجام تعمیرات لازم است:

- مخزن تخلیه شود
- مخزن تمیز شود

زیرا شبکه هوادهی باید از آب خارج شود تا امکان انجام عملیات تعمیر و نگهداری فراهم گردد.

۵,۲ سیستم متحرک یا قابل بیرون کشیدن (Retractable System)

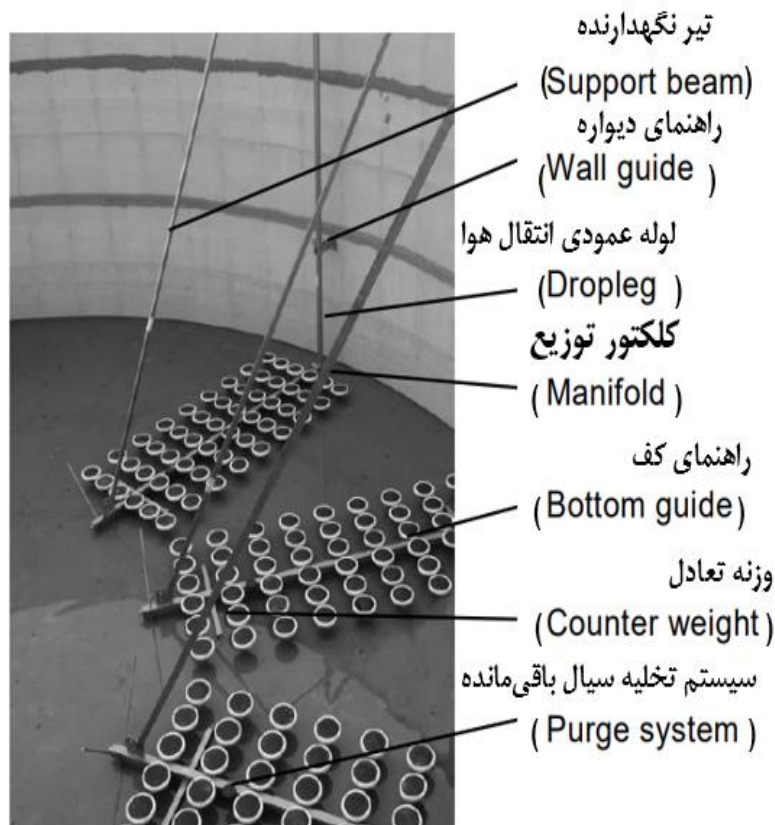
برخی سیستم‌های هوادهی در تصفیه‌خانه‌هایی نصب می‌شوند که تنها یک خط فرآیندی دارند یا شرایط فرآیندی اجازه تخلیه مخزن برای تعمیرات را نمی‌دهد. در چنین شرایطی، سیستم هوادهی متحرک می‌تواند جایگزین سیستم نصب‌شده در کف مخزن باشد. این سیستم امکان انجام تعمیرات و سرویس را بدون توقف فرآیند و تخلیه مخزن فراهم می‌کند. در نتیجه بهره‌برداری از سیستم هوادهی انعطاف‌پذیرتر شده و فرآیند تعمیر و نگهداری نیز ساده‌تر خواهد بود. با این حال، برای ایجاد استحکام کافی هنگام بالا کشیدن سیستم، تنها ماده مناسب برای ساخت فریم سیستم فولاد ضدزنگ است. استفاده از فولاد ضدزنگ در لوله‌کشی باعث افزایش هزینه سیستم نسبت به لوله‌های uPVC یا PP می‌شود.

بنابراین سیستم هوادهی متحرک معمولاً برای موارد زیر مناسب است:

- تصفیه‌خانه‌هایی با نیازهای خاص
- تصفیه‌خانه‌های کوچک با تعداد کم دیفیوزر
- تأسیساتی که سهولت تعمیر و نگهداری اولویت بالایی دارد

اجزای اصلی

اجزای اصلی یک سیستم هوادهی متحرک یا قابل بیرون کشیدن استاندارد در شکل ۷ نشان داده شده است.



شکل ۷. اجزای اصلی یک سیستم هوادهی متحرک / قابل بیرون کشیدن استاندارد

لوله عمودی نزولی انتقال هوا (Drop leg) همیشه با لوله‌های گرد ساخته می‌شود

در مرحله طراحی سیستم، افت هد و هزینه مواد لوله‌ها بطور همزمان بررسی می‌شود تا قطر مناسب لوله انتخاب گردد.

لوله‌کشی (Piping)

کلکتور توزیع (Manifold) می‌تواند از لوله‌های مربعی یا لوله‌های گرد ساخته شود. اگر دیفیوزرهای دیسکی استفاده شوند، معمولاً کلکتور گرد به کار می‌رود، زیرا اتصال آن به لوله‌های جانبی (Lateral Pipes) که دیفیوزرها روی آن نصب می‌شوند ساده‌تر است. در صورتی که دیفیوزرهای لوله‌ای استفاده شوند، مانیفولد می‌تواند از لوله گرد یا مربعی ساخته شود. این امر به این دلیل است که در این حالت لوله جانبی وجود ندارد و دیفیوزرهای لوله‌ای مستقیماً به مانیفولد متصل می‌شوند.

راهنمای دیواری (Wall Guide)

راهنمای دیواری وظیفه نگهداری و هدایت Drop leg را در حین بهره‌برداری سیستم بر عهده دارد. این قطعه به صورت یک پروفیل لوله‌ای مربعی طراحی شده که از یک سمت باز بوده و در قسمت بالایی دارای انبساط یا دهانه بازشونده است. این بخش بازشونده باعث می‌شود پایین آوردن اسکید هوادهی (Aeration Skid) در زمان نصب یا قرار دادن مجدد آن پس از تعمیرات، آسان‌تر انجام شود.

نکته: در مهندسی و صنعت، اسکید به یک سیستم فرآیندی (مانند هوادهی، پمپاژ یا فیلتراسیون) گفته می‌شود که تمامی اجزای آن بر روی یک قاب فلزی مستحکم نصب شده‌اند. این طراحی چند مزیت دارد:

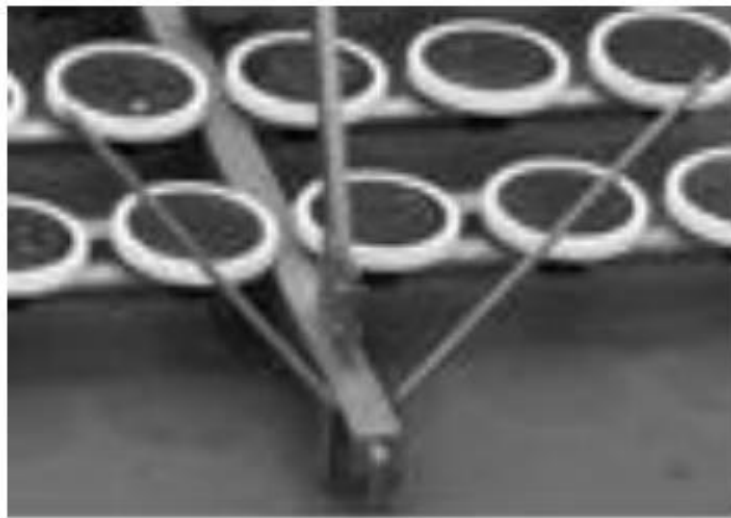
- **سهولت در جابه‌جایی:** کل سیستم را می‌توان با جرثقیل یا لیفتراک حرکت داد.
- **نصب سریع:** به جای نصب تک‌تک قطعات در محل پروژه، کل «اسکید» را یکجا در محل قرار می‌دهند.
- **تعمیرات آسان:** همان‌طور که در متن شما اشاره شده، باز کردن و بیرون کشیدن کل مجموعه برای تعمیرات بسیار راحت‌تر انجام می‌شود.



شکل ۸. راهنمای دیواری

راهنمای کف (Bottom Guide)

راهنمای کف با شکل V مانند، هنگام نصب سیستم به کف مخزن متصل می‌شود. این راهنما کمک می‌کند هنگام پایین آوردن اسکید درون مخزن پر از فاضلاب، سیستم در موقعیت صحیح قرار گیرد. همچنین این راهنما از حرکت جانبی اسکید هوادهی جلوگیری می‌کند؛ حرکتی که ممکن است در اثر جریان سیال و عملکرد تجهیزات اختلاط مانند Mixer یا Flow maker ایجاد شود.



شکل ۹. راهنمای کف

نیروی شناوری (Buoyancy)

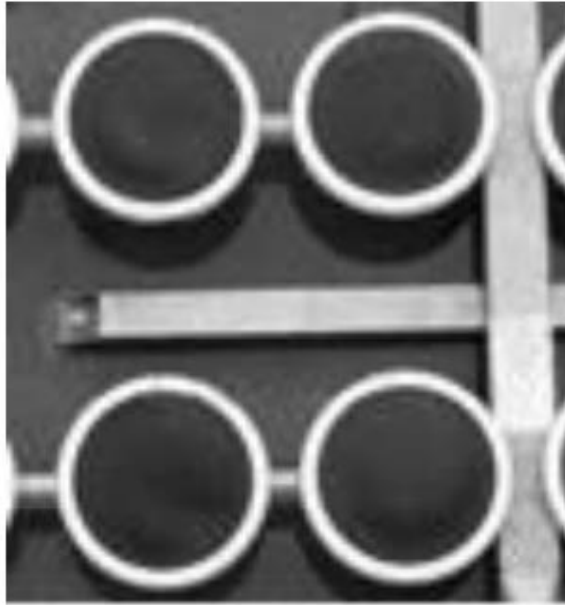
کنترل شناوری سیستم به دو روش انجام می‌شود تا اسکید هوادهی در کف مخزن ثابت باقی بماند:

۱. استفاده از وزن فریم استنلس استیل نگهدارنده دیفیوزرها

۲. افزودن وزنه تعادل (Counterweight)

وزنه تعادل مستقیماً داخل تیر اصلی (Beam) تعبیه شده و پایه‌های ترازکننده سیستم نیز روی همین بخش نصب می‌شوند. از وزنی بیشتر از نیروی شناوری سیستم استفاده می‌شود تا:

- اسکید در محل خود ثابت بماند
- تنش اضافی به اتصال فلنجی بالای Drop leg وارد نشود



شکل ۱۰. وزنه تعادل

۵/۳ اندازه حباب (Bubble Size)

یکی از ویژگی‌های مهم غشاهای انعطاف‌پذیر، تعداد سوراخ‌ها، اندازه و الگوی آرایش آن‌ها است. سوراخ‌ها به صورت شکاف‌های بسیار کوچک در غشا ایجاد می‌شوند، بدون آنکه بخشی از لاستیک حذف گردد. هر سوراخ به عنوان یک دهانه متغیر عمل می‌کند که هنگام باد شدن غشا و ورود هوا باز می‌شود.

دیفیوزرها معمولاً بر اساس اندازه این شکاف‌ها، و در نتیجه اندازه حباب‌های تولیدی، دسته‌بندی می‌شوند:

- دیفیوزرهایی با حباب‌های قطر ۰,۵ تا ۳ میلی‌متر (Fine Bubble Diffuser)
- دیفیوزرهایی با حباب‌های بزرگ‌تر (Coarse Bubble Diffuser)



شکل ۱۱. دیفیوزرهای ریز حباب و درشت حباب

غشایی با الگوی سوراخ کاری (۱-۱) به این معناست که:

- طول هر شکاف = ۱ میلی متر
- فاصله بین دو شکاف = ۱ میلی متر

این نوع سوراخ کاری تقریباً حباب‌هایی با قطر ۱ میلی متر تولید می‌کند و در دسته دیفیوزرهای حباب ریز قرار می‌گیرد.

هرچه شکاف‌ها و در نتیجه حباب‌ها کوچک‌تر باشند:

- راندمان انتقال اکسیژن بیشتر خواهد بود
- اما افت فشار روی غشا نیز افزایش می‌یابد

در مقابل، حباب‌های بزرگ‌تر:

- راندمان انتقال اکسیژن کمتری دارند
- ولی افت فشار کمتری ایجاد می‌کنند

بنابراین، در کاربردهایی که تأمین دبی هوا مهم‌تر از راندمان انتقال اکسیژن است، استفاده از دیفیوزرهای حباب درشت توصیه می‌شود.

بهترین نوع سوراخ کاری غشا برای انتقال اکسیژن شامل شکاف‌های کوچک و مجزا از یکدیگر است.

این نوع طراحی باعث:

- افزایش راندمان انتقال اکسیژن نسبت به افت فشار
- کاهش پدیده هم‌جوشی حباب‌ها

می‌شود؛ زیرا هم‌جوشی حباب‌ها باعث تشکیل حباب‌های بزرگ‌تر و کاهش راندمان انتقال اکسیژن خواهد شد.

۵/۴ سوراخ کاری و اندازه غشای دیفیوزر (Diffuser Membrane Perforations and Size)

در کاربردهای متداول تصفیه‌خانه‌های فاضلاب شهری و صنعتی، معمولاً از غشایی با سوراخ کاری ۱-۱ استفاده می‌شود.

این نوع سوراخ کاری:

- راندمان مناسب انتقال اکسیژن
- همراه با افت فشار قابل قبول

فراهم می‌کند.

همچنین سوراخ کاری ۱-۱ در عملکرد بلندمدت، مقاومت خوبی در برابر گرفتگی نسبت به سوراخ‌های کوچک‌تر نشان داده است. با این حال، در برخی طراحی‌های خاص مخزن، ممکن است به دلیل:

- محدودیت فضای سیستم هوادهی
- مقدار SOR مورد نیاز
- دبی هوای عبوری از دیفیوزرها

نیاز به نوع دیگری از سوراخ کاری غشا باشد.

غشا باید به گونه‌ای انتخاب شود که سیستم در دبی نامی خود عمل کند. کارکرد دیفیوزر در دبی بیش از حد مجاز می‌تواند باعث کاهش عمر غشا و افت عملکرد شود؛ دلیل این امر افزایش تنش مکانیکی و دمای غشا می‌باشد، همچنین در دبی‌های بسیار پایین نیز عملکرد کاهش می‌یابد، زیرا همه شکاف‌ها هوا عبور نمی‌دهند و احتمال گرفتگی غشا بیشتر می‌شود.

برای هر نوع سوراخ کاری، رابطه میان دبی هوا در هر دیفیوزر، SOTE بر متر، افت فشار روی غشا نشان می‌دهد که افزایش دبی بالاتر از مقدار نامی، منجر به موارد زیر می‌گردد:

- کاهش SOTE
- افزایش افت فشار
- افزایش هزینه بهره‌برداری

در طول بهره‌برداری، غشاها به مرور دچار گرفتگی (Fouling) می‌شوند. شستشو با اسید می‌تواند انعطاف‌پذیری غشا را بازیابی کند. برای این منظور، امکان نصب سیستم تزریق اسید روی Drop leg وجود دارد تا اسید به میزان کافی تزریق شود. زمانی که هوا به غشا وارد نمی‌شود، بخش مرکزی غشای دیفیوزر دیسکی به عنوان شیر یک‌طرفه عمل می‌کند؛ زیرا این قسمت مانند سایر بخش‌ها سوراخ کاری نشده است. این بخش به صورت درپوش روی سوراخ ورود هوا به غشا قرار می‌گیرد. همچنین امکان نصب یک شیر یک‌طرفه اضافی در ورودی دیفیوزرهای دیسکی وجود دارد.

۵/۵. دیفیوزر لوله ای در مقابل دیفیوزر دیسکی (Tube vs. Disc Diffuser)

معمولاً دو نوع اصلی طراحی دیفیوزر ارائه می‌شود:

- دیفیوزر دیسکی
- دیفیوزر لوله‌ای

هر دو نوع برای تأمین اکسیژن و ایجاد اختلاط در فرآیندهای مختلف، از جمله تصفیه‌خانه‌های فاضلاب، طراحی شده‌اند. هر دو مدل در نسخه‌های حباب ریز و حباب درشت قابل ارائه هستند.

رایج‌ترین انتخاب، دیفیوزر دیسکی است؛ زیرا:

- نصب آسان‌تری دارد

- کمتر تحت تأثیر نیروهای هیدرودینامیکی حوضچه قرار می گیرد

در مقابل، دیفیوزرهای لوله ای بیشتر در موارد زیر استفاده می شوند:

- طراحی های فشرده
- محدودیت فضا
- برخی سیستم های متحرک / قابل بیرون کشیدن (Retractable)

در سیستم های هوادهی متحرک، فریم نگهدارنده و توزیع هوا باید از استنلس استیل ساخته شود.

بنابراین دیفیوزرهایی که:

- بیشترین دبی هوا
- با کمترین میزان استنلس استیل مصرفی

را فراهم کنند، انتخاب مناسبی خواهند بود. به همین دلیل معمولاً در سیستم های متحرک از دیفیوزرهای لوله ای استفاده می شود. در سیستم های کف نصب (Bottom-Mounted) که لوله های توزیع هوا به کف متصل می شوند، دیفیوزرهای دیسکی معمولاً ترجیح داده می شوند. در کاربردهایی که خرابی سیستم می تواند بحرانی باشد، دیفیوزر دیسکی ممکن است انتخاب مناسب تری باشد. دیفیوزرهای لوله ای معمولاً دارای دهانه هوای بزرگ تری هستند؛ بنابراین در صورت:

- پارگی غشا
- خرابی بست ها

ممکن است حجم زیادی هوا از همان نقطه خارج شده و سایر بخش های سیستم با کمبود هوا مواجه شوند. با این حال، از نظر اصول عملکرد، تفاوت بنیادی میان دو نوع دیفیوزر وجود ندارد و هر دو را می توان بدون کاهش عملکرد سیستم در سیستم های کف نصب یا متحرک به کار برد.

۵,۶ لوله کشی (Piping)

جنس لوله ها (Pipe Materials)، لوله هایی که هوا را از کمپرسور به مخزن هوادهی منتقل می کنند، اغلب در معرض دمای بالا قرار دارند. به همین دلیل، لوله کشی تا Drop leg معمولاً از استنلس استیل ساخته می شود تا:

- در برابر حرارت مقاوم باشد
- گرما را به خوبی منتقل کند
- دمای هوا را قبل از ورود به سیستم کاهش دهد

همچنین فلز مقاومت بالایی در برابر خوردگی در محل عبور از سطح فاضلاب دارد. در شبکه هوادهی کف مخزن، جایی که فاضلاب باعث خنک شدن لوله ها و هوا می شود، می توان از:

- uPVC

- PP
- Stainless Steel

استفاده کرد.

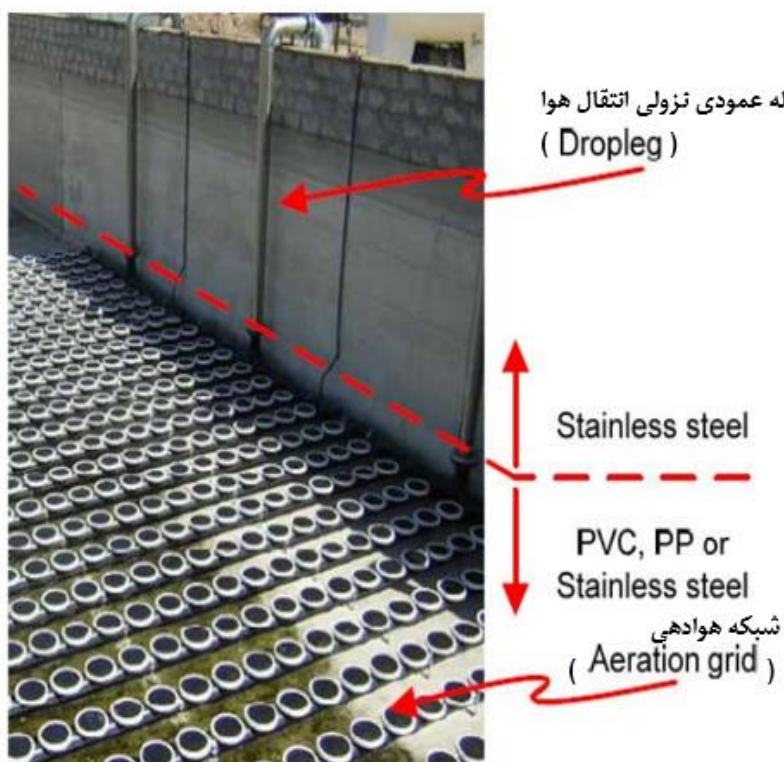
در سیستم‌های ثابت، مهم‌ترین عوامل انتخاب جنس لوله عبارت‌اند از:

- دمای هوا
- قیمت

بنابراین معمولاً از uPVC یا PP استفاده می‌شود.

بمنظور استحکام مکانیکی کافی، این لوله‌ها در کلاس‌های زیر عرضه می‌شوند:

- uPVC:
 - PN10
 - PN6
- PP:
 - PN6



شکل ۱۲؛ شرح افت هد

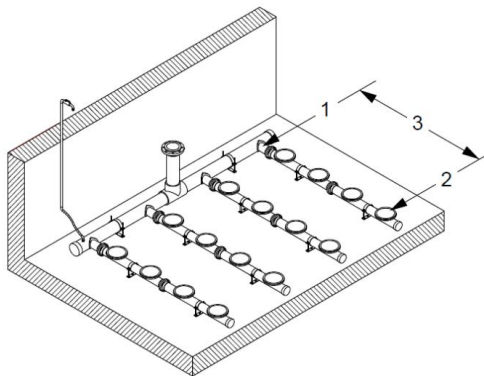
قاعده کلی:

- اگر عمق غوطه‌وری کمتر از ۷ متر باشد: PVC مناسب است
- اگر عمق بین ۷ تا ۱۰ متر باشد: PP توصیه می‌شود

با این حال، برای هر پروژه باید حداکثر دمای واقعی محاسبه و جنس مناسب انتخاب شود. در سیستم‌های متحرک، به دلیل نیاز به استحکام مکانیکی، تنها گزینه مناسب فولاد ضدزنگ است.

ابعاد لوله‌ها (Pipe Dimension)

در طراحی لوله‌کشی سیستم هوادهی، باید افت فشار در مانیفولدها و لوله‌های جانبی در مقایسه با افت فشار دیفیوزرها ناچیز باشد تا توزیع یکنواخت هوا تضمین شود. به‌طور معمول، اگر افت فشار بین آخرین نقطه تقسیم جریان و دورترین دیفیوزر کمتر از ۱۰٪ افت فشار دیفیوزر باشد، توزیع هوا مناسب خواهد بود.



شکل ۱۲؛ شرح افت هد

۱. نقطه تقسیم جریان
۲. آخرین دیفیوزر
۳. افت فشار بین نقاط ۱ و ۲ باید کمتر از ۱۰٪ افت فشار دیفیوزر باشد.

شرکت‌ها طیف گسترده‌ای از لوله‌ها با ابعاد و جنس‌های مختلف ارائه می‌دهند تا اقتصادی‌ترین طراحی از نظر افت فشار، تعداد Drop leg، لوله‌های جانبی امکان‌پذیر باشد.

به‌عنوان مثال، با استفاده از لوله جانبی قطر ۱۱۰ میلی‌متر، می‌توان طول لوله تا ۴۵ متر با ۷۰ دیفیوزر روی هر لوله را طراحی کرد، در حالی که ظرفیت هوادهی تقریباً یکنواخت باقی بماند. سیستم باید به‌گونه‌ای طراحی شود که سرعت هوا در لوله‌ها از ۱۰ تا ۱۵ متر بر ثانیه بیشتر نشود؛ زیرا سرعت بالاتر باعث موارد زیر می‌شود:

- افزایش شدید افت فشار
- افزایش صدا
- ایجاد لرزش

در برخی پروژه‌های بازسازی، تعداد Drop leg از قبل مشخص است و طراحی باید مطابق آن انجام شود. در این شرایط، توصیه می‌شود سرعت و نرخ هوا در Drop leg بررسی شود؛ زیرا افزایش بار فرآیندی ممکن است نیاز هوادهی را نسبت به سیستم قبلی تغییر داده باشد.

استانداردهای اتصال لوله‌ها

اتصال لوله‌ها بر اساس استانداردهای زیر انجام می‌شود:

جوشکاری استنلس استیل:

UNI EN ISO 15614-1:2004

جوشکاری PP :

DVS 2207-11

چسب‌کاری و جوش حلالی uPVC :

DVS 2207-12

۵,۷ سیستم سیستم تخلیه آب (Purge)

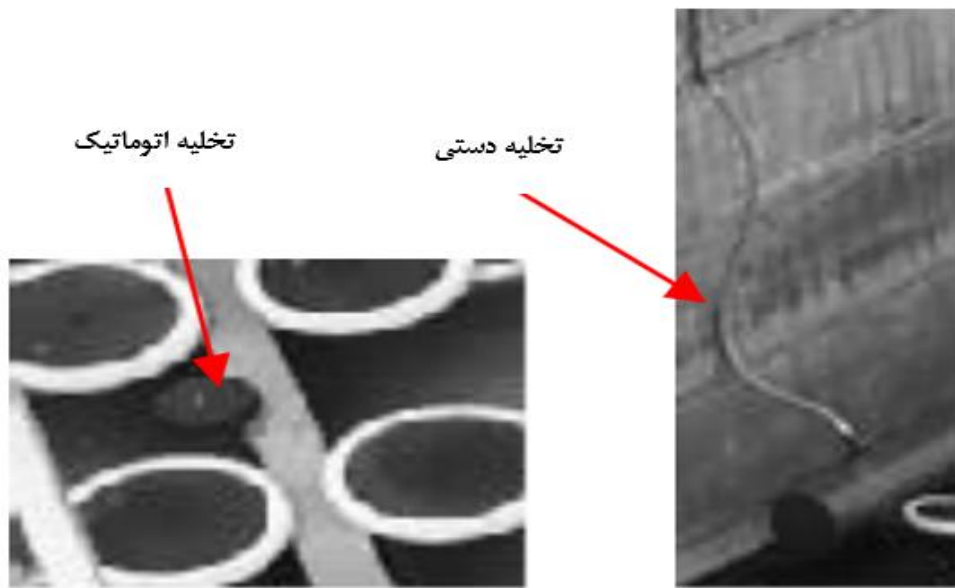
در حین بهره‌برداری، هوای گرم ناشی از کمپرسورها وارد سیستم شده و از دیفیوزرها خارج می‌شود. به دلیل اختلاف دما بین هوا و فاضلاب، بخار موجود در هوا روی دیواره داخلی لوله‌ها تقطیر می‌شود و در پایین‌ترین نقاط جمع می‌گردد. هدف سیستم تخلیه (Purge) حذف این آب جمع‌شده است.

در صورت عدم تخلیه:

- ظرفیت هوادهی کاهش می‌یابد
- افت فشار افزایش می‌یابد
- احتمال خوردگی بیشتر می‌شود
- محصولات خوردگی ممکن است باعث گرفتگی غشا شوند

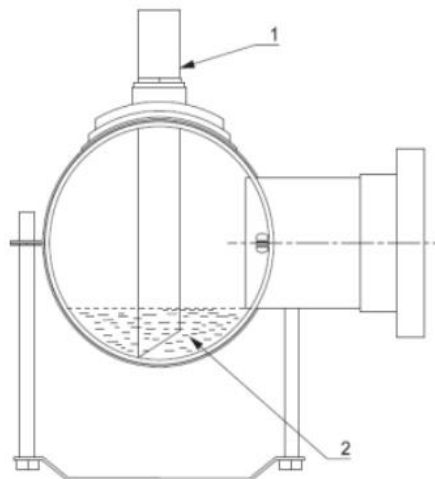
خروجی سیستم Purge می‌تواند بالای سطح آب (سیستم دستی) یا زیر سطح آب (سیستم پیوسته) باشد.

باید اطمینان حاصل شود که افت فشار مسیر Purge کمتر از مسیر دیفیوزرها باشد تا عملکرد ایرلیفت فعال گردد.



شکل ۱۳. سیستم تخلیه مداوم و دستی

سیستم Purge پیوسته زمانی توصیه می‌شود که فاصله بین تعمیرات طولانی باشد؛ زیرا این سیستم نیازمند مصرف مقدار کمی هوای اضافی است. از آنجا که آب تقطیر شده در پایین‌ترین نقطه جمع می‌شود و فلنج‌های اتصال جانبی در مرکز مانیفولد قرار دارند، معمولاً مانیفولد پایین‌ترین بخش سیستم است. بنابراین سیستم Purge باید به پایین‌ترین نقطه متصل شود. وقتی Purge باز است، مانند یک پمپ Airlift عمل کرده و آب را با استفاده از هوای کمپرسور تخلیه می‌کند.



شکل ۱۴. مکش سیستم تخلیه

۱. اتصال Purge

۲. پایین‌ترین نقطه سیستم دارای رطوبت

۵/۸. افت هد سیستم

برای رساندن هوا به دیفیوزرها، کمپرسور باید فشار کافی در Drop leg تأمین کند.

افت فشار کل سیستم شامل سه بخش است: ۱. عمق غوطه‌وری دیفیوزر ۲. لوله‌ها و اتصالات ۳. دیفیوزرها
رابطه افت هد:

$$H_t = H_s + H_p + H_d$$

که در آن:

- H_t = افت هد کل
- H_s = افت ناشی از عمق غوطه‌وری
- H_p = افت لوله‌ها
- H_d = افت دیفیوزر

افت ناشی از عمق غوطه‌وری ثابت است، اما افت لوله‌ها و غشا تابع دبی هوا هستند. در طول عمر سیستم:

- افت لوله‌ها تقریباً ثابت می‌ماند
- افت غشا به دلیل گرفتگی و تخریب شیمیایی افزایش می‌یابد

بنابراین افزایش افت هد کل می‌تواند شاخص زمان مناسب شستشوی غشاها باشد. برای توزیع یکنواخت هوا، تمام دیفیوزرها باید افت فشار یکسانی داشته باشند؛ زیرا هوا همواره از مسیر کم‌مقاومت‌تر عبور می‌کند. در طراحی سیستم باید افت فشار بین کمپرسور و شبکه دیفیوزر نیز لحاظ شود.

۵/۹ افزایش دمای هوای فشرده (Temperature Increase of Compressed Air)

فشرده‌سازی هوا برای غلبه بر افت فشار سیستم باعث تولید گرما می‌شود. به‌طور کلی، دمای هوای کمپرسور حدود ۱۰ درجه سانتی‌گراد به ازای هر متر عمق افزایش می‌یابد. دمای نهایی خروجی کمپرسور از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$t_t = t_s + t_o + t_a$$

واحد	شرح
t_t	درجه سانتی‌گراد افزایش دمای کل در سیستم
t_s	درجه سانتی‌گراد افزایش دما ناشی از غوطه‌وری (فشار ستون آب)
t_o	درجه سانتی‌گراد افزایش دما ناشی از سایر هدها (تلفات فشار لوله‌کشی و غیره)
t_a	درجه سانتی‌گراد دمای محیط



هوای خروجی مستقیماً وارد لوله‌ها و غشاهای سیستم می‌شود؛ بنابراین این تجهیزات باید توان تحمل دمای بالا را داشته باشند. برای مخزنی با عمق ۸ متر:

- افزایش دما ناشی از عمق $\approx 8^{\circ}\text{C}$
- دمای محیط 20°C
- دمای خروجی کمپرسور $\approx 100^{\circ}\text{C}$

به دلیل دمای بالا، هوای خروجی معمولاً توسط لوله‌های استنلس استیل به سیستم منتقل می‌شود.

در مسیر انتقال، هوا مقداری خنک می‌شود و هنگام ورود به بخش غوطه‌ور، انتقال حرارت به دلیل ضریب انتقال حرارت بالاتر آب افزایش می‌یابد. به همین دلیل در شبکه کف مخزن اغلب از لوله‌های پلاستیکی استفاده می‌شود، اما همچنان باید محدودیت دمایی آن‌ها بررسی شود.

قاعده کلی:

دمای لوله تقریباً برابر میانگین دمای هوا و دمای آب است. این دما باید کمتر از حداکثر دمای مجاز جنس لوله باشد.

خرداد ماه ۱۴۰۵

بخش تحقیق و توسعه

شرکت فنی و مهندسی آریا بهین تصفیه

تهران، شهرک الهیه غرب، خیابان سهند، کوچه سهند ۲ پلاک ۷۵ واحد ۲

تلفن: ۰۲۱-۴۴۷۸۴۵۷۷



پست الکترونیکی: info@ariabehintasfiye.ir

پایگاه اینترنتی: ariabehintasfiye.ir

کانون تخصصی مهندسی محیط زیست و آب و فاضلاب



<https://ble.ir/specializedcenterofenvironmental>

