www.wwes.ir ▪ Waterwwes@gmail.com ▪Alireza Asaddokht

"تهویه فاضلابروها: فاکتورهای اثرگذار روی جریان هوا و روش های مدل سازی"

خلاصه:

مدل‌سازی و آنالیز تهویه فاضلابروها نوعاً به عنوان بخشی از مطالعات کنترل بو انجام می‌گیرد. انتظار می رود مدل‌های هیدرولیکی سیستم فاضلاب نتایج دینامیکی نسبتاً دقیقی در کل سیستم فراهم کنند. مدل‌های هیدرولیکی فاضلابروها توانایی به مراتب کمتری دارند که موضوع به علت محدودیت‌های فنی نمی‌باشد و عمدتاً به ذات مشکل برمی‌گردد. این مقاله فاکتورهای اصلی و مهمی که روی جریان هوا در سیستم فاضلابروها اثر گذار است را توصیف و درخصوص مدل‌های تهویه موجود بررسی‌هایی را ارائه می‌کند. همچنین این مقاله در مورد چالش‌های پیش روی مدل‌سازی‌های تهویه فاضلابروها بحث‌هایی را ارائه می‌نماید.

معرفی:

موضوع مدل‌سازی جریان هوا و تهویه در فاضلابروها زیرمجموعه مدل‌سازی سراسری شبکه‌های فاضلاب می‌باشد. مدل‌های تهویه فاضلابروها عموماً به عنوان بخشی از یک آنالیز برای تعیین انتشار بو از سیستم فاضلاب مورد نظر یا موجود استفاده می‌شود. برای محاسبه و تولید نرخ انتشار جرم[1]، نرخ‌های محاسبه شده تهویه با غلظت‌های اندازه گیری شده یا تخمین زده شده مواد تولید کننده بو ترکیب می‌شود. مواد رایج و متداولی که برای این هدف مورد آنالیز قرار می‌گیرند سولفید هیدروژن و همچنین ترکیبات آلی فرار خاص می‌باشند که به عنوان موادی که پتانسیل تولید بو را دارند، شناخته شده‌اند.

در حالت ایده‌آل مدل‌های تهویه سیستم‌های فاضلاب می‌توانند محل‌هایی در شبکه فاضلاب که احتمال خروج گازهای فاضلاب از آن‌ها وجود دارد را پیش‌بینی نماید. علاوه بر این، این مدل‌ها قادر خواهند بود تا نرخ جریان هوا برای اینکه بتوان نرخ انتشار جرم فعلی سیستم قابل محاسبه باشد، را محاسبه نمایند. در ادامه این موارد می‌تواند به عنوان داده‌های ورودی برای مدل‌های انتشار کیفی

[1] Mass emission rate

هوا برای تعیین اینکه در صورتیکه مشکلات مربوط به تولید بو وجود داشته باشد، استفاده شوند. نرخ‌های جریان هوا همچنین برای طراحی سیستم‌های تصفیه هوا[2] (ATF) و برای کنترل بوهای تولید شده، لازم می‌باشند.

استفاده دیگری که از مدل‌های تهویه می‌شود، محاسبه خوردگی بالقوه در شبکه می‌باشد. در این حالت اجزای مشابه (به عنوان مثال نرخ‌های تهویه فاضلابروها و غلظت سولفید هیدروژن) نیاز هستند.

این مقاله روی فاکتورهایی که روی جریان هوا در سیستم‌های فاضلاب اثرگذار و به درک فعلی ما از فرایندهای دخیل در این روند نزدیک می‌باشد، تمرکز دارد. این شامل هم پدیده‌های شناخته شده مانند تداخل هوا و فاضلاب در لوله‌ها تا موضوعاتی مانند رانش جریان هوا در تونل‌های خالی مربوط به سرریز شدن جریان فاضلاب شبکه های مختلط که تاکنون مقاله علمی معتبری منتشر نشده است، می گردد.

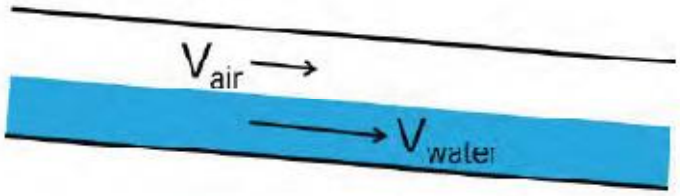
این مقاله شدت اجزای تشکیل دهنده مشکل را ارائه نمی‌دهد. در نهایت روش‌های متداول و جاری مدل‌سازی مورد بررسی قرار گرفته و بحثی در مورد چگونگی ارائه مدل‌های اجرا شده بیان گردیده است.

فاکتورهای اثرگذار روی جریان هوا در سیستم های فاضلاب

1- برخورد آب[3]

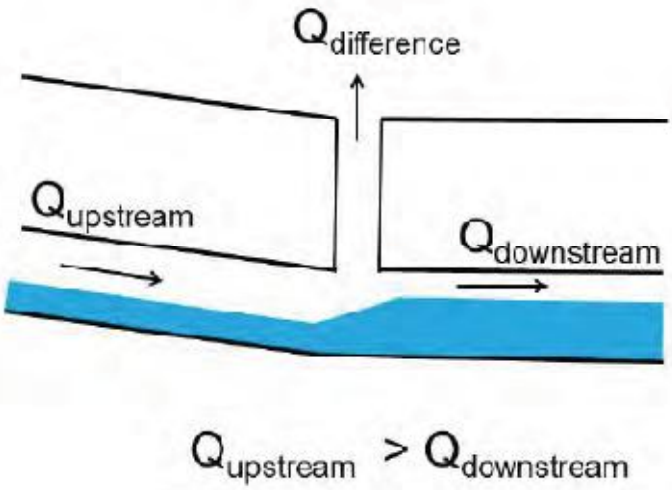
مهمترین فاکتور در تعیین جریان هوای فاضلابروها عمدتاً برخورد بین سطح آب و هوا در قسمت بالایی لوله می‌باشد. (شکل1) مشخص شده است که به دلیل این اثر، همواره جریان هوا در جهت حرکت جریان فاضلاب بوده است مگر اینکه نیروی مکانیکی‌ای مانع این موضوع گردد. (WERF 2009) سرعت جریان هوا نوعاً کمتر از سرعت جریان مایع می‌باشد و دامنه آن حدوداً 5% تا 30% متوسط سرعت سیال است. (Pescod & Price 1982)

[2] Air treatment facilities (ATF)
[3] Water Drag



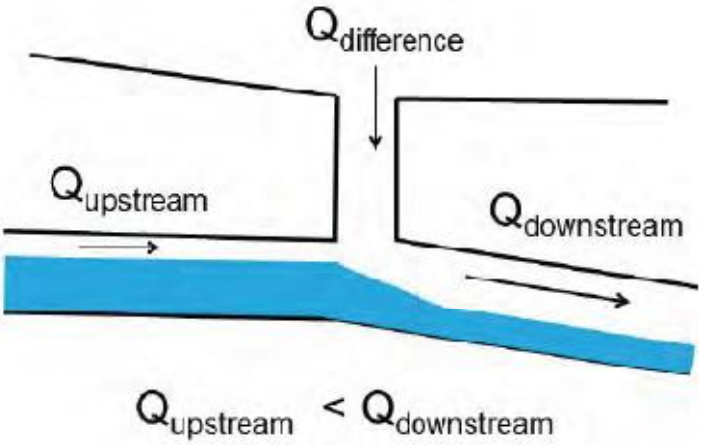
شکل 1- سطح برخورد جریان هوا در یک فاضلابرو

زمانیکه جریان هوا در مقطع پایین دست کمتر از جریان هوا در مقطع بالا دست باشد، این اختلاف جریان هوا از نزدیک‌ترین منهول خارج می‌گردد. این حالت به عنوان مثال زمانیکه شیب کاهش پیدا می کند، اتفاق می‌افتد. یعنی در این حالت در انتهای مقطع عمق جریان افزایش و سرعت جریان کاهش پیدا می‌کند. این حالت فقط منجر به کاهش در سرعت هوا نمی‌گردد، بلکه سطح بالای جریان کاهش پیدا می‌کند. ترکیب این حالات باعث کاهش قابل توجه در نرخ جریان هوا خواهد شد. این مطلب در شکل 2 نشان داده شده است.



شکل 2- تهویه فاضلابرو به علت اختلاف در جریان هوایی

معکوس این حالت در شکل 3 نشان داده شده که در این حالت هوا به داخل سیستم رانده می‌شود.



شکل 3 – مکش هوا به داخل فاضلابرو به عت اختلاف در جریان هوایی

در حالت ایده‌آل امکان پیش‌بینی منطقی سرعت جریان هوا براساس سرعت فاضلاب وجود دارد که در ادامه امکان محاسبه نرخ جریان‌های هوایی امکان‌پذیر خواهد شد. به هرحال، نتایج مطالعات میدانی نشان داده‌اند که متغیرهای بیشتری در نرخ جریان هوا و به تبع آن سرعت آن وجود دارد و نمی‌توان فقط با پارامتر سرعت فاضلاب به تنهایی بیان گردد. (Madsen et al. 2006)

2- فشار هوا

این پارامتر دومین فاکتور مهم توزیع فشار هوا در سیستم می‌باشد. هوا، مانند تمام سیالات از مکانی با فشار بالا به سمت مکانی با فشار پایین جریان پیدا می‌کند. برخلاف آب، هوا سیالی تراکم‌پذیر است و اثرات ناشی از تراکم پذیری آن می‌تواند بسیار مهم باشد. اگر فشار هوا در یک سیستم به طور دقیق محاسبه شده باشد، میزان جریان هوا با دقت قابل قبولی قابل محاسبه خواهد بود.

اگر سیستم بسته باشد، این موضوع امکان‌پذیر خواهد بود. در یک سیستم فاضلاب واقعی بازشوهای زیادی از جمله منهول‌ها و شفت‌های ریزشی به فضای اتمسفر پیرامون وجود دارند که این موضوع سبب می‌شود برای مدل نتوان مرز دقیقی را ترسیم نمود و مرزی که برای سیستم در نظر گرفته می‌شود بسیار ضعیف باشد. مطالعات تجربی نشان داده‌اند که همبستگی کم و ضعیفی بین

منهول و فشار لوله وجود دارد و پارامترهای اندازه گیری شده ممکن است روی فشار اثرگذار باشند. این پارامترها می‌توانند شامل سرعت باد، فشار اتمسفریک، دمای قسمت بالای فاضلابرو، رطوبت اتمسفریک، رطوبت قسمت بالای فاضلابرو و فشار هوا باشد. (Parker & Ryan , 2001)

اختلاف‌های بین فشار هوا که روی نرخ جریان هوایی اثر می‌گذارد، بسیار کم است. نوسانات اتمسفریک محلی به عنوان مثال نوعاً به واسطه اختلاف فشارهای در حد 4 میلی بار ناشی می‌شوند. با توجه به اینکه فشار پیرامونی حدود 1013 میلی بار است، تفاوت رانشی حدود 0/4% می‌باشد. یک فشار 4 میلی باری معادل 40 میلی متر ارتفاع آب می‌باشد. اختلاف فشار از منهول تا منهول شاخص WERF(2009) و Pescod & Price (1982) در حد 0/02 میلی بار یعنی معادل 0/2 میلیمتر آب می باشد.

3- سازه‌های ریزشی

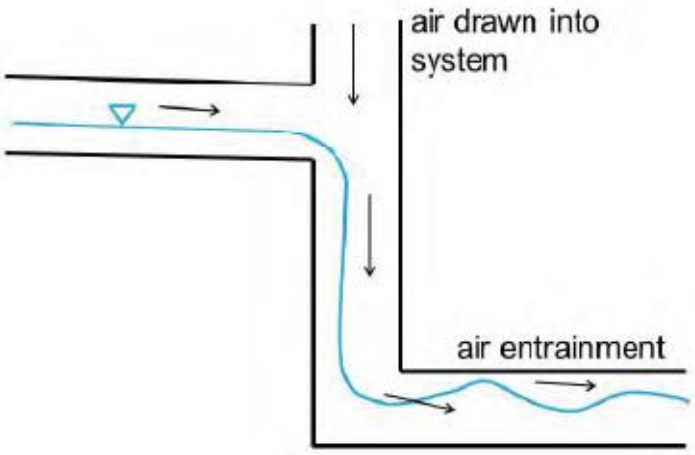
سیستم‌های فاضلاب علاوه بر منهول‌ها و لوله‌ها دارای سازه‌های هیدرولیکی مختلفی می‌باشند. این سازه‌ها روی جریان هوا اثرگذار می‌باشد. سازه‌های ریزشی، به عنوان مثال، سازه‌هایی هستند که متداولاً در شبکه مورد استفاده قرار می‌گیرند و ویژگی‌های فاضلاب و جریان هوا را پیچیده‌تر می‌نمایند.

2 نوع شفت‌های ریزشی اصلی وجود دارد: ورتکس و شیبدار[4]. شفت‌های ورتکس باعث می‌شوند جریان به صورت پیچدار به سمت پایین حرکت و برای حرکت به سمت پایین به دیواره‌های کناری بچسبد. بنابراین میزان ورود هوا به داخل آن و اثرات شوک‌های هیدرولیکی به حداقل می‌رسد. شفت‌های شیب‌دار اجازه می‌دهند تا فاضلاب ریزش آزاد داشته باشد.

برخی از شفت‌های ریزشی برای کاهش میزان هوای وارد شونده به لوله پایین دست، دارای دریچه‌ها و حفره‌های هواگیری می‌باشند.

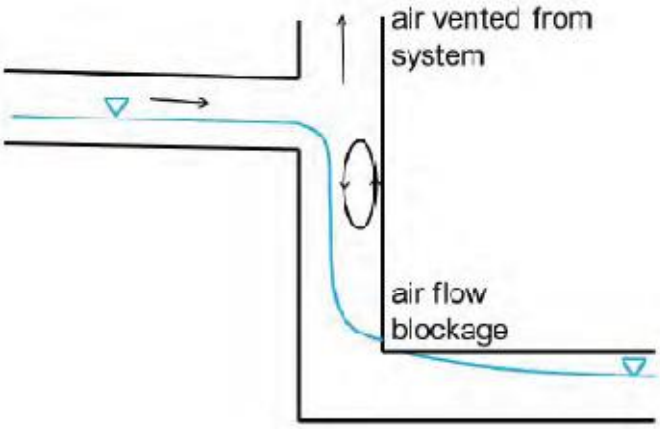
شکل4 روندی که طی آن هوا به سیستم وارد می شود را نشان می دهد. در این حالت همچنین هوا وارد جریان فاضلاب می‌شود. این هوایی که وارد جریان فاضلاب شده است معمولاً در پایین دست از جریان فاضلاب خارج می‌شود.

[4] plunge



شکل 4- مکش هوا به داخل یک سازه ریزشی

گونه دیگری از سازه ریزشی در شکل 5 نشان داده شده است. در این حالت سطح آب یک انسداد موقتی جریان هوا[5] را ایجاد می-کند که جریان هوایی بالادست در محل سازه تهویه شود. در این سازه‌های ریزشی که این تهویه هوا به صورت دائمی صورت می-پذیرد، نقاطی هستند که اغلب مشکل بو وجود خواهد داشت.

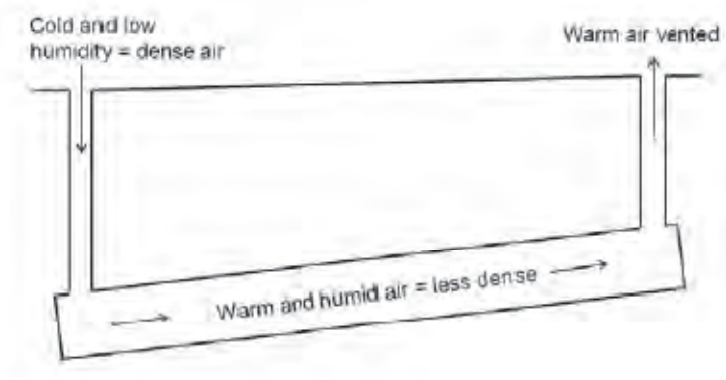


شکل 5- تهویه هوا از یک سازه ریزشی

[5] Temporary air flow block

4- اثرات غوطه‌وری (بالا بری)

هوا در شبکه جمع آوری فاضلاب اغلب نسبت به هوای محیط دانسیته کمتری دارد. (Pescod and Price,. 1981) این موضوع به علت 2 فاکتور می‌باشد: رطوبت و دما. براساس موارد غیرشهودی، هوایی که دارای رطوبت بیشتری می‌باشد، چگالی کمتری دارد. این به این دلیل است که بخار آب، با وزن مولکولی 18 گرم بر مول، دانسیته کمتری نسبت به هم نیتروژن (با وزن مولی 28 گرم) و هم اکسیژن (با وزن مولی 32 گرم) دارد. همچنین خیلی تعجب انگیز نیست که هوای داخل فاضلابروها رطوبت بیشتری نسبت به هوای محیط داشته باشد. در زمستان هوا در فاضلابروها همچنین گرم تر و و از اینرو سبک‌تر از هوای محیط می‌باشد. همچنین به عنوان مثال در یک تونل CSO[6] (تونلی که برای سرریز شدن شبکه فاضلاب مرکب طراحی و ساخته می شود) که در زمان‌های عادی خالی می‌باشد، شاهد این موضوع می‌باشیم که هوای چگال‌تر وارد آن می‌شود و باعث جابجایی هوای سبک‌تر موجود در تونل که مشکل بو را دارند می شود. این مورد، مثالی از سیرکولیشن که غوطه‌وری نیروی محرک آن می‌باشد، است. این موضوع همچنین اثر stack یا اثر chimney نامیده می شود. این مطلب در شکل 6 نشان داده شده است.

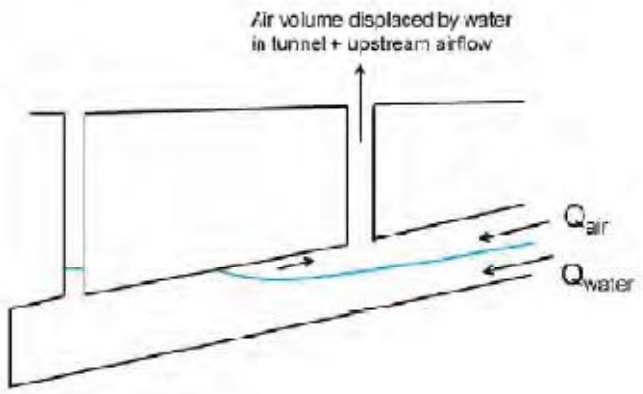


شکل 6 – نیروی محرکه غوطه وری و تهویه در یک تونل CSO

[6] Combined sewer overflow (CSO)

5- تونل‌های ذخیره CSO

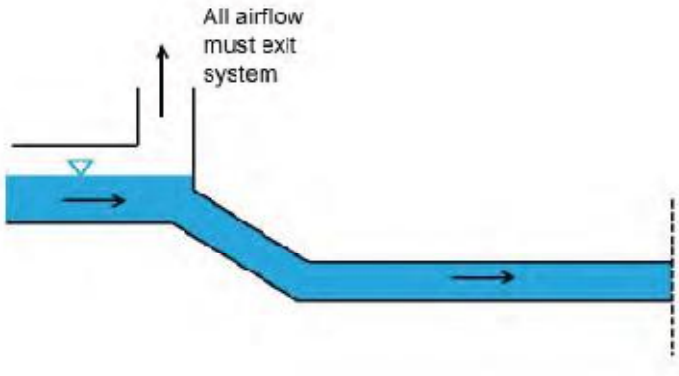
تونل‌های ذخیره‌ای که به منظور ذخیره جریان‌های سرریز شده از فاضلابروهای مرکب ساخته می‌شوند (یا هر تونلی که برای ذخیره موقت جریان فاضلاب وجود دارد) مانند آنچه که در شکل 7 نشان داده شده است، روند خاصی برای پر شدن دارند. با پر شدن تدریجی تونل، فضای آزاد بالای سطح تونل محدودتر می‌شود و حرکت هوا به سمت پایین دست را مسدود می‌نماید. همچنین با توجه به ورود آب، به همان حجم هوا از تونل تخلیه می‌شود. این هوا به سمت بالا دست و به سمت نزدیک‌ترین شفت ریزشی حرکت می‌کند و از طریق آن به همراه سایر جریانات هوایی از شفت خارج می‌شوند. این روند در زمان وقوع CSO شدت بیشتری به خود می‌گیرد و نرخ بالایی از جریان هوا را ایجاد می‌کند.



شکل 7 – پر شدن یک تونل CSO و خروج هوا

6- سیفون‌ها

در زمانیکه مسیر سیفون به طور کامل پر می‌باشد، مانعی برای جریان هوا می‌باشد. این بدان معنی است که تمام هوای موجود در فاضلابرو همانگونه که در شکل 8 نشان داده شده است باید قبل از سیفون و در بالادست آن به طور کامل از مسیر تخلیه شوند. این موضوع پتانسیلی را برای یک نقطه بالقوه تولید بو ایجاد می کند. در این زمان یک راه حل ایجاد یک پرش هوایی با استفاده از یک لوله کوچک متصل شده به بالادست و پایین دست سیفون می باشد.



شکل 8 – تهویه هوا در بالادست یک سیفون

روش‌های مدل‌سازی

الف) مدل‌های موجود

در حالت کلی 3 روش اصلی برای مدل‌سازی تهویه فاضلابروها وجود دارد که به ترتیب محبوبیت عبارتند از:

- تجربی
- محاسباتی
- ترمودینامیک

مدل‌های تجربی گرایش به ایجاد همبستگی بین پارامترهای هیدرولیکی قابل اندازه گیری یا قابل محاسبه با سرعت هوا دارند. روابط تجربی زیادی وجود دارند که طی سالیان گذشته از آن‌ها به این منظور بهره‌گیری شده است. ولی در میان آن‌ها معروف ترین رابطه، رابطه ای است که توسط Pescod and Price (1982) بیان شده است:

$$V_{air} = 0.397\left(WV_w / P_{air}\right)^{0.7234}$$

که در این رابطه:

V air: متوسط سرعت در فضای باز بالای لوله فاضلابرو (m/s)

W: عرض سطح آب (m)

Vm: سرعت آب (m/s)

P air: محیط فضای باز بالای لوله (m)

مدل‌های محاسباتی عموماً مدل‌های محاسباتی دینامیک سیالات مبتنی بر اجزای محدود هستند. این مدل ها هم جریان هوا و هم جریان آب را محاسبه یا هیدرولیک را وارد محاسبات می‌کنند و مدل عددی را نسبت به رژیم جریان محدود می‌کنند.

مدل‌های مبتنی بر ترمودینامیک کمتر رایج می‌باشند. این مدل‌ها برای محاسبه جریان هوایی که به واسطه نیروی بالابرنده از فاضلابرو خارج می‌گردد، بهترین نتایج را دارد. بنیاد تحقیقاتی آب و محیط زیست[7] (WERF) یک روند از هر نوع مدل را آزمایش کرده است. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان می‌دهد که تمام این مدل‌ها تا حدی دقت کافی را ندارند و در اغلب حالات بیش از مقدار پیش‌بینی شده را نتیجه می‌دهند. با توجه به نتایج مشخص شد که در نرخ‌های پایینتر جریان هوا، نتایج غیر دقیق‌تر خواهد بود. در نرخ‌های جریان هوای بالاتر مدل‌ها بهتر عمل می‌کنند و در برخی حالات با جریان اندازه گیری شده منطبق است. ولی عموماً دارای اختلاف 2 تا 3 برابری می‌باشد.

این نکته قابل توجه می‌باشد که دیدگاه طراحی این حقیقت که مدل‌ها جریان‌های هوایی را بیش از آن چیزی که هستند، پیش‌بینی می‌کنند، لزوماً یک نتیجه نامطلوب نمی‌باشد و این حقیقت که مدل‌ها در نرخ‌های جریان هوایی بالا نتیجه بهتری می‌دهند، می تواند یک نتیجه مثبت باشد.

تمام روش‌هایی که در بالا مورد بحث قرار گرفت، در حالت پایا و ثابت[8] می‌باشند. با توجه به دشواری موجود در برخورد با مدل‌های در حالت پایا و ثابت و تولید نتایج منتطقی، پیشبرد مدل‌های دینامیک در این موضوع اولویت نمی‌باشد. مورد استثنا در این موضوع

[7] Water Environmental Research Foundation (WERF)
[8] steady state

محاسبه جریان های هوا به سبب پر شدن تونل‌ها می باشد. در این حالت نتایج مدل‌سازی هیدرولیکی دینامیک بصورت مستقیم مورد استفاده قرار می گیرد.

ب) مدل های آتی

لازم به ذکر است، درک مشکلات مربوط به هوا و جریانات هوا ذاتاً برای آنالیز سخت و دشوار می‌باشند. به عنوان مثال،در مدل‌سازی پراکندگی کیفی هوا، هر نتیجه با فاکتور 2 تا 4 از غلظت اندازه‌گیری شده مطلوب در نظر گرفته می شود. همواره این تمایل و گرایش وجود داشته است که فکر می‌شده مدل‌سازی هوای فاضلابروها همانند مدل‌سازی هیدرولیکی فاضلابروها انجام گیرد. اما هیچ‌وقت اینگونه نبوده است. به هر حال، موارد زیادی وجود داشته‌اند که مدل‌سازی هوای فاضلابروها با هدف شناسایی مشکلات در نقاطی از سیستم با موفقیت انجام گرفته است و نتایج در طراحی راه‌حل‌ها استفاده شده است.

در آینده داشتن دستورالعمل مدل‌سازی تهویه هوای داخل فاضلابروها مشابه مدل‌های هیدرولیکی مطلوب خواهد بود. در آن حالت مدل‌هایی وجود خواهند داشت که فشار هوا، سرعت و میزان جریان، دینامیک و پایا بودن در سراسر سیستم را تولید خواهد کرد. مانعی که بر سر این راه وجود دارد تکنولوژیکی نیست و بیشتر به طبیعت و ذات مشکل بر می‌گردد.

مشکلات بو در سیستم‌های فاضلابرو دامنه گسترده‌ای از دوره‌های زمانی از دوره‌های کوتاه مدت (نوعاً مربوط به زمان‌های بارش) تا دوره‌ای همیشگی و دائمی را شامل می‌گردد. مشکلات دائمی عمدتاً مربوط به اثرات غوطه‌وری (ایجاد شدن نیروی بالابرنده) یا وقوع در نقاطی از سیستم که هوا به طور دائمی در حال تهویه می‌باشد (بخش 2) می باشد.

مدل‌های دینامیکی این قابلیت را می‌دهند تا نتایجی مشابه مدل‌های هیدرولیکی تولید گردد. این می‌تواند اولین گام در فراهم کردن متغیرهای زمانی پیش‌بینی بو و پیشبرد استراتژی‌های مناسب کاهش اثرات آن باشد. به عنوان مثال، محلی که در ارزیابی‌ها و مدل-

سازی ها مشخص شده در زمان وقوع باران‌های شدید و متوسط پتانسیل تولید بو در آنجا وجود دارد، از آنجاییکه در این دوره زمانی که نسبتاً کوتاه می باشد، نارضایتی و اعتراض مردم پیش نخواهد آمد، نیاز به پیاده‌سازی اقدامات کاهشی و اصلاحی ندارد.

فرایندهایی که طی آن‌ها حرکت هوا در فاضلابرو رخ می‌دهد، منطقاً درک شده است. در هر حال چیزی که در سیستم رخ می‌دهد می‌تواند همچنین توسط شرایط مرزی و نوسانات فشار از یک منهول تا منهول دیگر که مهمتر می‌باشد، تحت تأثیر قرار گیرد. در حال حاضر دلایل این تغییرات و نوسانات با پارامترهایی مانند سرعت باد یا فشار هوای محیط و مانند آن‌ها که منطقاً به نظر می‌آید مهم باشند، همبسته نشده اند. (همبستگی بین آن‌ها ایجاد نشده است) حتی اگر همبستگی زیادی بین آن‌ها یافت شود، به نظر نمی-رسد چیزی بیشتر از داده‌های هواسنجی معمولی (مثلاً داده‌های هواسنجی محلی سطح بالا و با دقت منهول به منهول) در دسترس باشد.

نتیجه‌گیری

این مقاله فاکتورهایی که روی جریان هوا در سیستم‌های فاضلابرو را خلاصه می‌نماید. این کار بخشی از آنالیز انتشار بو از فاضلابروها می‌باشد. بخش دوم این پازل تعیین غلظت مواد تولید کننده بو که نوعاً سولفید هیدروژن و ترکیبات آلی فرار خاص می-باشد، است.

فاکتورهای اصلی که روی جریان هوا در فاضلابروها اثر می‌گذارند عبارتند از:

1- کشش آب (water drag)
2- اختلاف جریان هوا در بخش‌هایی از لوله که باعث می‌شود که هوای بیشتری تهویه گردد.
3- اختلاف جریان هوا در بخش‌هایی از لوله که باعث می‌شود هوا به داخل سیستم کشیده شود.
4- تفاوت فشار در طول سیستم
5- سازه‌های ریزش
6- اثرات غوطه‌وری (نیروی بالا برنده)
7- پر شدن تونل‌های CSO
8- سیفون‌ها

در حال حاضر مدل‌های تهویه فاضلابرو به سه دسته کلی تقسیم بندی می گردد:

1- تجربی
2- محاسباتی
3- ترمودینامیکی

در حالت کلی مدل‌ها دشواری‌هایی را در پیش‌بینی دقیق نرخ‌های جریان هوا بخصوص در نرخ‌های پایین دارند. این مدل‌ها برای تعیین مناطق بالقوه مشکل‌دار در سیستم بسیار سودمند می‌باشند.

موانع موجود بر سر راه ارتقاء و پیشبرد مدل‌ها فنی نیستند، بلکه بیشتر ناتوانی در پیش‌بینی شرایط مرزی‌ای است که بطور گسترده روی سیستم اثر گذار می‌باشد. اینها عمدتاً مربوط به اختلاف و تفاوت‌های فشار است که از یک منهول تا منهول دیگر متفاوت است.

مترجم : علیرضا اسددخت

منابع:

Corsi, R. L. and C. J. Quigley. 1996. “VOC Emissions from Sewer Junction Boxes and Drop Structures: Estimation Methods and Experimental Results.” *Journal of the Air & Waste Management Association* 46 (3): 224–33.

Deering, S., S. Jepsen, A. Acevedo and M. Taylor. 2006. “Sewer Siphon Assessment and Air Jumper Design.” *Proceedings of the Water Environment Federation Annual Conference, Dallas, TX, October 21–25*.

Dincer, F. and A. Muezzinoglu. 2008. “Odor Causing Volatile Organic Compounds in Wastewater Treatment Plant Units and Sludge Management Areas.” *Journal of Environmental Science and Health, Part A,* 43 (13): 1569–74.

Edwini-Bonsu, S. and P. M. Steffler. 2004. “Air Flow in Sanitary Sewer Conduits due to Wastewater Drag: A Computational Fluid Dynamics Approach.” *Journal of Environmental Engineering Science* 3 (5): 331–42.

Hentz, L. H., S. Eftekharzadeh and R. Atoulikian. 2013. “Ventilation and Odor Control for Sewers & Tunnels.” Ohio WEA Annual Conference, Mason , Ohio, June 18–20.

Joyce, J., H. W. Sorensen and M. M. Smith. 2000. “Large Diameter Sewer and Tunnel Ventilation Characteristics and Odor Control: Recent Developments and Case Histories.” *Proceedings of the Water Environment Federation Annual Conference, Anaheim, CA, October 14–18*.

Madsen, H. I., T. Hvitved-Jacobsen and J. Vollertsen. 2006. “Gas Phase Transport in Gravity Sewers: A Methodology for Determination of Horizontal Gas Transport and Ventilation.” *Water Environment Research* 78 (11): 2203–9.

Miller, C. W. and L. M. Hively. 1987. “A Review of Validation Studies for the Gaussian Plume Atmospheric Dispersion Model.” Journal of Nuclear Safety 28 (4): 522–31.

Olson, D. A., S. Rajagopalan and R. L. Corsi. 1997. “Ventilation of Sewers: The Role of Thermal Gradients.” Advanced Environmental Research 1(3): 312–22.

Parker, W. J. and H. Ryan. 2001. “A Tracer Study of Headspace Ventilation in a Collector Sewer.” Journal of the Air & Waste Management Association 51 (4): 582–92.

Pescod, M. B. and A. C. Price. 1981. “Fundamentals of Sewer Ventilation as Applied to the Tyneside Sewerage Scheme.” Water Pollution Control 90 (1): 17–33.

Pescod, M. B. and A. C. Price. 1982. “Major Factors in Sewer Ventilation.” Journal of the Water Pollution Control Federation 54 (4): 385–97.

Pistilli, J. P and J. Joyce. 2012. “Ventilation, Odor and Corrosion Control for Large Diameter Collection Systems.” Michigan WEA Annual Collections Seminar, Bath, MI, September 6.

Wang, Y. C., N. Nobi, T. Nguyen and L. Vorreiter. 2011. “A Dynamic Ventilation Model for Gravity Sewer Networks.” Water Science & Technology 65 (1): 60–8.

Water Environment Research Foundation (WERF). 2007. “Minimization of Odors and Corrosion in Collection Systems.” Alexandria, VA: Water Environment Research Foundation. Report No. 04-CTS-

Water Environment Research Foundation (WERF). 2009. “Collection System Ventilation Research Report.” Alexandria, VA: Water Environment Research Foundation. Report No. 04-CTS-1A.

Zhao C. H., D. Z. Zhu, S. K. Sun and Z. P. Liu. 2006. “Experimental Study of Flow in a Vortex Drop Shaft.” Journal of Hydraulic Engineering 132 (1): 61–8.