

بهینه‌سازی طراحی گازگیر لجن UASB به منظور افزایش سرعت در بستر لجن بدون تغییر سرعت در ناحیه‌ی زلال‌سازی

مجید حکیم جوادی (مربی)

ایوب ترکیان (دانشیار)

سیدجمال‌الدین هاشمیان (دانشیار)

مرکز تحقیقات آب و انرژی، دانشگاه صنعتی شریف

با توجه به این که کلید اصلی در فرایند UASB وجود گرانول است، حفظ آن‌ها در حین بهره‌برداری، از اولویت‌های بهبود کارایی این سیستم‌ها می‌باشد که از طریق بهینه‌سازی طراحی گازگیر قابل انجام است. در طرح پیشنهادی، گازگیر از مخلوط لجن آب و گاز پر شده و قسمتی از مسیر جریان رو به بالا به مخزن مجاور عمود بر گازگیرهای واکنشگر منحرف می‌شود. در این مخزن، گاز از لجن آب جدا شده، لجن مرغوب ته‌نشین و به واکنشگر بازگشته و لجن نامرغوب به پمپ‌خانه اصلی ارسال و همراه فاضلاب تغذیه به کف واکنشگر برگردانده می‌شود. در طرح بهینه‌شده می‌توان سرعت در بستر لجن را بدون تغییر در سرعت ناحیه‌ی زلال‌سازی در بالای گازگیر زیاد نمود. همچنین افزایش سرعت لجن آب در زیر گازگیر از صفر به حدود ۳۸ متر بر ساعت احتمال جداسازی گاز از لجن را به شدت افزایش خواهد داد. به این طریق نه تنها جداسازی گاز از لجن بهتر می‌شود بلکه افزایش سرعت رو به بالا باعث افزایش تماس بین لجن و فاضلاب شده و عملکرد سیستم بهبود می‌یابد. از دیگر مزایای فنی و اقتصادی طرح پیشنهادی، حذف سیستم لوله‌کشی جمع‌آوری گاز، عدم ضرورت وجود آویز و بازوهای نگه‌دارنده‌ی گازگیر در داخل واکنشگر، امکان ساخت گازگیر بزرگ‌تر و کاهش اتلاف سطح ناشی از هم‌پوشانی، سادگی دسترسی به داخل واکنشگر از فاصله‌ی بین گازگیرها برای امور تعمیر و نگهداری، و کاهش ارتفاع مورد نیاز در محفظه‌ی تنظیم فشار و تله شعله می‌باشد.

واژگان کلیدی: گازگیر، سرعت رو به بالا، لجن بی‌هوازی، UASB، تصفیه‌ی بی‌هوازی.

مقدمه

از زمان معرفی سیستم UASB در اوایل دهه‌ی ۸۰ میلادی، صنایع با شدت آلودگی متوسط و بالا^[۱] و اخیراً فاضلاب شهری (Singh and Viraraghavan, 2000; Behling et al, 1997) از آن با موفقیت استفاده کرده‌اند. کلید موفقیت در این روش وجود لجن‌های دانه‌بندی شده‌ی کارآمد بوده که از ویژگی ته‌نشینی مناسبی نیز برخوردارند.^[۲] پارامتر مهم دیگر در کارایی این واکنشگرها وجود سرعت رو به بالای کافی به منظور بهبود بخشیدن به تماس بین فاضلاب و ذرات لجن،^[۳] ارتقاء ویژگی‌های جدایش گاز از لجن^[۴] و حفظ زمان ماند هیدرولیکی در محدوده‌ی قابل قبول است. این در حالی است که سرعت بیش از حد نیز می‌تواند باعث شکسته شدن دانه‌ها (گرانول‌ها) و کاهش کارایی شود.^[۵] گازگیرهایی نیز در قسمت بالای واکنشگر برای جداسازی گاز از لجن و بازگرداندن آن به بستر واکنشگر تعبیه می‌شود که طراحی آن نسبتاً ساده است و روایت‌های بهبودیافته‌ی آن نیز وجود

روند رو به افزایش قیمت انرژی و تشدید مقررات پردازش و دفع لجن در دهه‌های اخیر انگیزه‌ی مناسبی برای استفاده از روش‌های بی‌هوازی در تصفیه‌ی فاضلاب‌های صنعتی فراهم کرده است.^[۶] هم‌زمان با این افزایش، شناخت مهندسی نسبت به شیوه‌های رفع مشکلات راهبری و نگهداری گسترش یافته و روایت‌های جدیدی از این سیستم‌ها به بازار عرضه شده است. از بین این سیستم‌ها، روش «بستر لجن با جریان رو به بالا» به دلیل کارایی بیشتر و امکان بازگرداری بالاتر در تصفیه‌ی فاضلاب‌های صنعتی با شدت آلودگی زیاد، با استقبال بیشتری مواجه شده است. در حال حاضر از این سیستم در تنوعی از صنایع با شدت آلودگی زیاد (نظیر صنایع لبنی، الکل‌سازی، قند و غیره) بهره‌برداری می‌شود. بهبود تدریجی فناوری و مهارت‌های راهبری امکان ایجاد و حفظ لجن کارآمد را ممکن ساخته، و حاصل آن انجام تصفیه در زمان‌های ماند هیدرولیکی کوتاه‌تر است.

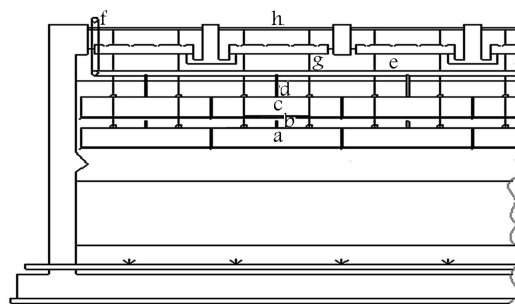
دارد. [۸] البته رفتار واقعی این واکنشگر بی‌هوای چندفازی بسیار پیچیده و حاصل اندرکنش چندین پدیده فیزیکی نظیر ویژگی‌های میدان جریان سیال، رفتار ذرات لجن، پراکنش و گرادیان سوبسترا بوده که جمعاً بر فرایندهای انتقال جرم و نهایتاً عملکرد واکنشگر تأثیر می‌گذارند. [۹]

در این پژوهش طرح جدیدی از گازگیر ارائه می‌شود که مشکلات گازگیرهای متداول را ندارد و در ضمن امکان تغییر سرعت رو به بالا در بستر لجن را بدون تغییر سرعت سیال در منطقه آرامش فراهم می‌سازد. اجتناب از تجمع لجن در زیر گازگیر و به حداقل رساندن برآیند نیروی شناوری و وزن گازگیر و به تبع آن حذف کل شبکه‌ی جمع‌آوری گاز و آویزها و بازوهای نگه‌دارنده‌ی گازگیرها، از بین بردن حساسیت راهبری نسبت به تنظیم فشار در زیر گازگیرها و ساده‌سازی دست‌یابی به داخل واکنشگر برای امور تعمیر و نگهداری از دیگر مزیت‌های این طرح است.

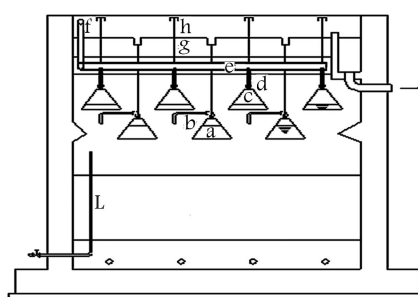
تبیین موضوع

طرح متداول

در سیستم UASB، فاضلاب خام از طریق لوله‌ی توزیع واقع در کف به واکنشگر وارد، و ضمن حرکت به سمت بالا با عبور از بستر لجن حاوی گرانول تصفیه می‌شود (شکل ۱). متان و دیگر گازهایی که به صورت حباب‌های کوچک در بستر لجن وجود دارند، حاصل سوخت‌وساز ریزاندامگان (میکروارگانسیم‌ها) هستند. [۱۰] در ابتدا کشش سطحی بین حباب و لجن نسبت به نیروی شناوری زیاد است ولی با بزرگ شدن تدریجی اندازه‌ی حباب‌های گازی، نیروی شناوری آن‌ها افزایش می‌یابد و ضمن چسبیدن به لجن و متلاطم ساختن ناحیه‌ی بستر لجن، گرانول‌ها را شناور می‌سازد و به سمت گازگیرها حرکت می‌دهد. گازگیرهای دوطبقه با هم‌پوشانی مناسب در ارتفاع میانی واکنشگر باعث حبس لجن شناور-که گاز خود را در اثر بزرگ شدن حباب از دست داده و به طبقات پائین واکنشگر سقوط می‌کند- می‌شود. [۱۱، ۱۲] گاز



الف) مقطع طولی،



ب) مقطع عرضی.

شکل ۱. واکنشگر UASB متداول.

انباشته شده در زیر گازگیر توسط لوله‌های جمع‌آوری به خارج از واکنشگر هدایت می‌شود. برای این که لجن شناور وارد این لوله‌ها نشود، تنظیم فشار از طریق ارتفاع هد آب در بیرون واکنشگر به‌صورتی انجام می‌شود که سطح مشترک گاز و لجن آب در زیر گازگیر در حد معینی حفظ شود. [۱۳]

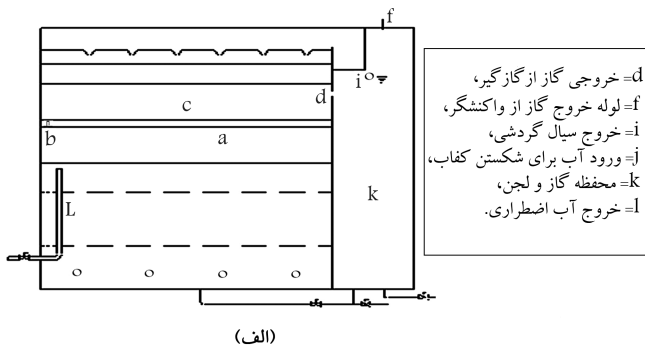
سرریزهایی که فاضلاب تصفیه‌شده را به منظور خروج از سیستم به کانال‌های جمع‌آوری می‌ریزد، در سطح فوقانی واکنشگر اجرا می‌شود. منطقه‌ی بین گازگیر تا سرریز ناحیه‌ی آرامش است که در آن ذرات سبک لجن عبوری از منطقه‌ی متلاطم گازگیر ته‌نشین (رسوب) می‌شود و بدین ترتیب زلال‌سازی صورت می‌گیرد. این ذرات پس از نشست روی گازگیرها و حرکت در امتداد شیب آن‌ها، به پایین گازگیرها برمی‌گردند. شرط سقوط لجن عاری از حباب گاز در منطقه‌ی آرامش، کوچک‌تر بودن مجموع نیروی شناوری و بازدارندگی^۲ از وزن دانه است:

$$V\gamma - V\rho g > C_D A \rho v^2 / 2$$

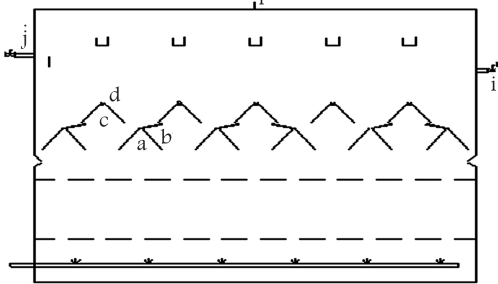
که در آن γ و V به ترتیب وزن مخصوص و حجم ذره‌ی لجن، ρ جرم مخصوص سیال، g شتاب ثقل، C_D ضریب بازدارندگی، A سطح دایره‌ی عظیمه‌ی ذره، و V سرعت رو به بالای سیال است. سرعت رو به بالا در منطقه‌ی آرامش و زیر گازگیر-یعنی ناحیه‌ی واکنش- یکسان است.

مشکلات موجود

واکنشگرهای UASB متداول در ارتباط با گازگیرها و سرعت رو به بالای سیال با دو مشکل عمده مواجه‌اند. به منظور پیشگیری از ورود کف و لجن آب به داخل لوله‌های جمع‌آوری گاز، بیشترین حجم زیر گازگیر به گاز اختصاص یافته و سهم این حجم برای لجن شناور کم است. با تجمع لجن، احتمال کاهش جدایش گاز از لجن و فرار آن از زیر گازگیر و انتقال آن همراه با سیال به منطقه‌ی آرامش بیشتر می‌شود و عملاً کارایی مورد نظر تأمین نمی‌شود. مشکل دیگر ناشی از حجم گاز در زیر گازگیر و ایجاد نیروی شناوری در کل گازگیر است که مستلزم تعبیه‌ی ستون یا آویزهای عمودی و افقی برای استقرار گازگیرها در محل است. سیستم لوله‌کشی جمع‌آوری و انتقال گاز نیز علاوه بر هزینه‌بر بودن نیازمند مهارت‌های ویژه به منظور نصب و گازبندی آن است. از سوی دیگر، هرگونه غفلت اپراتور در تنظیم مناسب ارتفاع گاز در زیر گازگیر ممکن است باعث ورود لجن به لوله‌های جمع‌آوری و انسداد آن‌ها یا خارج شدن لجن شناور گاز از زیر گازگیر شود. مشکل دیگر محدودیت سرعت رو به بالای فاضلاب (1 m/hr) است، بدین معنا که با تشکیل، تثبیت و افزایش چگالی گرانول‌ها امکان تماس بین فاضلاب و گرانول کاهش می‌یابد و نیز مقداری از بستر لجن مفید در منطقه‌ی ورودی (که شعاع تأثیر جریان از سوراخ‌های لوله‌های شبکه‌ی توزیع قادر به ایجاد تلاطم در آن نیست) تجمع کرده و بلااستفاده باقی می‌ماند. [۱۴] همچنین از آنجا که اساساً نیروهای هیدرودینامیکی و تنش برشی در تشکیل و استحکام گرانول‌ها مؤثرند، می‌توان تصور کرد که سرعت رو به بالای بیشتر باعث تشکیل گرانول‌های کارآمدتر می‌شود. [۱۵] بنابراین در صورت تأمین سرعت رو به بالای بیشتر، فعالیت ویژه‌ی گرانول‌ها و نیز حجم کل لجن مفید افزایش می‌یابد و در نتیجه شاهد کوچک‌تر شدن واکنشگر و اقتصادی‌تر شدن سرانه‌ی هزینه‌ی تصفیه‌ی تقاضای بیوشیمیایی اکسیژن^۳ BOD خواهیم بود. خلاصه این که اگر بتوان به نحوی مخلوط گاز و لجن محبوس در زیر گازگیر را همراه با قسمتی از مایع از زیر گازگیر خارج کرد، می‌توان از تجمع لجن شناور سبک در زیر گازگیر جلوگیری، و دغدغه‌ی فرار لجن از زیر گازگیر و ورود آن به منطقه‌ی آرامش بدون جداسازی گاز را برطرف



(الف)



(ب)

شکل ۲. شماتیک طرح بهینه شده واکنشگر UASB.

شد. در قسمت بالایی مقطع عرضی گازگیر، سوراخ بزرگی که مشکل انسداد نداشته باشد تعبیه می‌شود تا سیال از آن خارج شود و وارد مخزن گاز و لجن شود.

مخزن گاز و لجن

این مخزن (k) به صورت سرپوشیده و گازبند با عرض کم در طول واکنشگر و عمود بر گازگیرها ساخته می‌شود (شکل ۲ الف). برای این که گاز مخلوط با سیال در این محفظه جدا شود، ارتفاع سقف این مخزن می‌تواند برابر دیوار واکنشگر یا قدری بلندتر از آن باشد. گازها از لوله‌هایی که در سقف است به سمت دستگاه ایمنی انفجار هدایت می‌شوند. لجن آب از زیر یک زیرگذر^۴ که ارتفاع سیال بالا دست آن بسیار کم است (۲۰-۱۵ سانتی‌متر) به پمپ‌خانه می‌ریزد (شکل ۳ ب). لجن نامرغوب و ذرات سبک حل نشده مثل دانه‌های ریزکاه و برگ و چوب در این مخزن شناور شده و لجن مرغوب ته‌نشین می‌شود. اگر تجمع لجن شناور زیاد باشد، از زیر زیرگذر لب‌پر می‌زند و به پمپ‌خانه‌ی اصلی رفته و دوباره به واکنشگر بازمی‌گردد. در کف مخزن گاز و لجن چند خروجی تعبیه می‌شود که همگی توسط یک شیر به کف واکنشگر وصل می‌شوند. در صورت لزوم می‌توان با تخلیه‌ی زلال از پائین‌تر از سرریزها، سطح آب زلال در واکنشگر را پایین آورد (شکل ۲ الف). در این صورت، با بازکردن شیر مذکور، به علت اختلاف فشار بین مخزن و واکنشگر، لجن از کف مخزن به واکنشگر هدایت، و سپس شیر بسته می‌شود. در بالای دیواره‌ی عرضی مخزن گاز و لجن و در ارتفاع سطح سیال لوله‌ی نصب می‌شود که توسط یک شیر به لوله‌ی دهش پمپ ورودی وصل است و در مواقع لزوم می‌توان از این طریق به سطح لجن شناور در این مخزن آب پاشید (شکل ۳ ب) و لجن‌های سنگین‌تر را که از طریق چسبیدن حباب گاز به آن‌ها شناور شده‌اند ته‌نشین کرده و از لجن نامرغوب جدا کرد.

کرد. از این طریق امکان افزایش سرعت رو به بالا در بستر لجن نیز فراهم می‌شود تا ضمن تشدید اختلاط لجن با فاضلاب در منطقه‌ی واکنش، این سرعت از سرعت سیال در منطقه‌ی آرامش مستقل شده و کارایی سیستم بهبود یابد.

گزینه‌های بهبود

چنان که یادآور شدیم علاوه بر کاهش مشکلات تجمع لجن در زیر گازگیر، افزایش سرعت رو به بالا مستقل از سرعت در ناحیه‌ی آرامش و بهبود عملکرد جدایش گاز از لجن مد نظر است. در روایت اولیه UASB یک طبقه گازگیر وجود داشت که تجربه نشان داد وجود حداقل دو طبقه تأثیر عمده‌ی در بهبود جداسازی گاز از لجن می‌گذارد. همچنین به علت محدودیت ارتفاع، مشکلات اجرای آن‌ها در واکنشگر، و محدود شدن دسترسی به داخل واکنشگر از لحاظ فنی اقتصادی، افزایش تعداد طبقات گازگیرها عملی نیست. در مورد سرعت رو به بالا می‌توان سطح ناحیه‌ی آرامش را افزایش داد تا از این طریق بتوان بدون تجاوز از محدوده‌ی سرعت مجاز ناحیه‌ی آرامش، سرعت بالاتری در قسمت پایینی حاکم کرد. این گزینه نیز به علت افزایش هزینه‌های ساخت و اجرا عملاً امکان‌پذیر نیست. علاوه بر این، احتمال افزایش تجمع لجن و تشدید مشکلات در زیر گازگیرها نیز وجود دارد. گزینه‌ی دیگر افزایش ارتفاع مفید واکنشگر است تا احتمال بزرگ شدن و جدایش حباب گاز بر اثر تغذیه‌ی بیشتر لجن از مواد آلی و همچنین کاهش هد بر حباب و سقوط لجن بیشتر شود. این گزینه در افزایش سرعت تأثیری ندارد، اما افزایش هزینه‌ی اجرا نیز از تبعات آن است.

طرح پیشنهادی

بر اساس مطالب یادشده، لازم است به نحوی مخلوط گاز و لجن محبوس در زیر گازگیر خارج شود تا ضمن ممانعت از تجمع لجن شناور سبک در زیر گازگیر، احتمال فرار لجن نیز کاهش یابد. از طرف دیگر سرعت رو به بالا در بستر لجن نیز باید مستقل از منطقه‌ی آرامش افزایش یابد تا از طریق تشدید تماس ذرات لجن و فاضلاب، کارایی سیستم بهبود یابد. این اهداف در طرح پیشنهادی با تغییر ابعاد و چیدمان گازگیر، و نیز خارج کردن مخلوط سه‌فازی گاز و مایع و ذرات لجن از گازگیر و هدایت آن به محفظه‌ی در مجاورت واکنشگر اصلی تأمین می‌شود (شکل ۲). این موضوع در ادامه به تفصیل شرح داده شده است.

گازگیر

معمولاً در طرح‌های متداول به علت ضرورت کاهش نیروی شناوری گاز، گازگیرها در ابعاد کوچک طراحی می‌شوند. استفاده از این گازگیرها مستلزم ارتباط سوراخ‌های گاز و در نتیجه مشکل شدن اجرا است. در طرح پیشنهادی، ضرورت وجود فشار معکوس گاز درون گازگیر تأمین شده توسط دستگاه تنظیم فشار از بین رفته چون به سیال سه‌فازی (آب و لجن و گاز) اجازه داده می‌شود که تمام حجم گازگیر را به صورت مخلوط پر کند. لذا چون نیروی شناوری در گازگیر کمینه می‌شود، لازم نیست گازگیر حتماً در ابعاد کوچک ساخته شود، و با ازدیاد طول گازگیر می‌توان دو سر آن را در دیوارهای طولی مستقر کرد. بر این اساس، تعداد گازگیر مورد نیاز به شدت کاهش می‌یابد و برای مورد یادشده در نمونه‌ی طراحی از ۴۳ عدد به ۱۱ عدد می‌رسد. از سوی دیگر، به علت ضرورت هم‌پوشانی گازگیرها، هر قدر عرض گازگیر زیاد شود مقطع کل عبور جریان زیاد و سرعت رو به بالای سیال در بین گازگیرها کم خواهد

نمونه‌ی طراحی

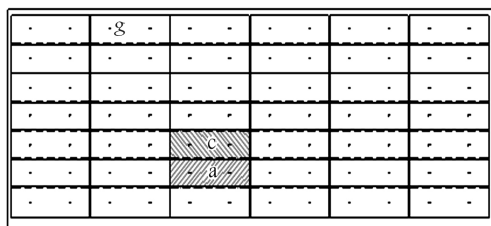
مفروضات

برای اثبات عملی بودن طرح پیشنهادی، محاسبات مورد نیاز در یک مورد انجام می‌شود (شکل ۳). این محاسبات برای واکنشگری با ارتفاع مفید ۵/۵ متر، دبی حجمی $900 m^3 d^{-1}$ ، سرعت رو به بالا در بالای گازگیر ۰/۷ و بستر لجن ۲/۵ متر بر ساعت، و زمان ماند هیدرولیکی ۸ ساعت اعمال شده است. بنابراین حجم مفید $300 m^3$ و سطح مقطع واکنشگر $54.54 m^2$ خواهد شد.

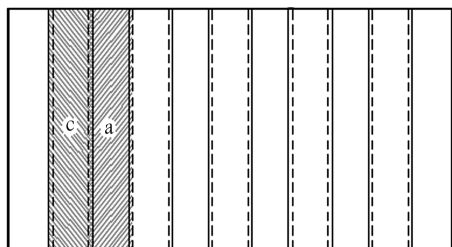
اگر برای صرفه‌جویی در دورریز آرماتور بدنه‌ی طولی واکنشگر ۱۲/۱ ضخامت دیوارهای اصلی ۰/۴ متر باشد، طول مفید واکنشگر (a) و عرض مفید (b) به ترتیب ۱۱/۳ و ۴/۸ متر خواهد شد. با احتساب عرض ۰/۷ متر برای مخزن گاز و لجن، و ضخامت ۰/۲۵ متر برای دیوار جداکننده‌ی مخزن از واکنشگر اصلی، عرض کل خارجی واکنشگر ۶/۵۵ متر می‌شود. سرعت در بالای منطقه‌ی آرامش نیز با احتساب کانال‌های فرعی و اصلی سرریزها حدود ۱ متر بر ساعت خواهد بود.

گازگیر

اگر برای هر گازگیر سوراخی به قطر $10 cm$ روی دیوار بین محفظه‌ی اصلی و مخزن گاز و لجن در منتهی‌الیه قسمت بالایی گازگیر به‌طور مستقیم و بدون زانوئی با اتصال دیگری در نظر گرفته شود، فاصله‌ی بین گازگیر و مخزن گاز و لجن فقط یک سوراخ است. بنابراین گرفتگی لوله‌ی انتقال گاز که در طرح‌های معمول UASB بر اثر ورود لجن به این لوله‌ها به وجود می‌آید منتفی است. از طرف دیگر چون گاز در این نوع گازگیر نمی‌تواند ذخیره شود، نیروی شناوری در گازگیر وجود ندارد و حضور ستون یا آویز ضرورتی ندارد. تعداد کل گازگیرها از ۴۳ عدد برای مورد طرح متداول (شکل ۴ الف) به ۱۱ عدد برای طرح پیشنهادی (شکل ۴ ب) کاهش می‌یابد که قابل توجه است. با توجه به مطالب یادشده، گازگیر در بدترین شرایط (خالی بودن واکنشگر) فقط باید وزن خود را تحمل کند و تحت اعمال هیچ‌گونه فشار و تنش اضافی نیست، و بنابراین این می‌تواند به‌راحتی طول آن را افزایش داد. اگر این طول ۴/۸ متر در نظر گرفته شود،

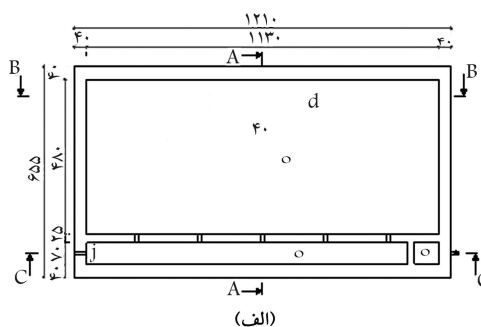


الف) طرح متداول،

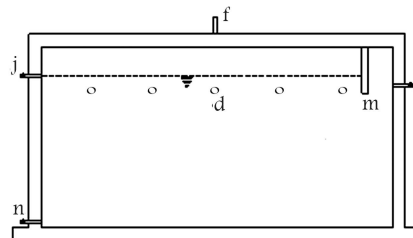


ب) طرح پیشنهادی.

شکل ۴. پلان گازگیرها در دو طرح متداول و پیشنهادی.



(الف)



(ب)

f= خروج سیال گردشی، j= ورود آب برای شکستن کفاب،
i= شیر انتقال لجن به واکنشگر اصلی، m= زیر گذر sludge.

شکل ۳. پلان و مقطع واکنشگر و مخزن گاز و لجن.

سرعت رو به بالا

در واکنشگرهای UASB متداول، بیشینه‌ی سرعت رو به بالا در حدود ۱ متر بر ساعت حفظ می‌شود تا لجن از سیستم فرار نکرده و دستگاه دچار کمبود لجن نشود. در طرح پیشنهادی سرعت را می‌توان تا ۲/۵ برابر افزایش داد که امکان و جزئیات محاسبات آن در بخش نمونه طراحی آورده شده است. افزایش سرعت سیالی که دانه‌ی لجن و حباب گاز چسبیده به آن را حمل می‌کند، احتمال جداسازی حباب گاز و سقوط لجن را افزایش می‌دهد. از آنجا که در این طرح بردار سرعت در داخل گازگیرها افقی است و مقدار آن در حین حرکت عرضی زیاد می‌شود و در انتها به حداقل ۲۰ برابر سرعت رو به بالا خواهد رسید، نمود این امر شدیداً مشهود است. اگرچه افزایش سرعت رو به بالا امری مطلوب است ولی با توجه به تغییر شرایط، احتمال سقوط لجن نیز نباید کاهش یابد. برای اطمینان از سقوط دانه‌ی لجن، تقاضای نیروی ثقل و شناوری باید بزرگ‌تر از نیروی بازدارندگی باشد. سرعت در اطراف دانه‌ی لجن از صفر در روی جسم تا سرعت V در بیرون از لایه‌ی مرزی لجن تغییر می‌کند. با استفاده از نتایج حاصله از تحقیقات پیرامون ویژگی‌های ذرات گرانول^[۱۶] و^[۱۷] فرض مشابهت عملکرد فاضلاب با آب تمیز، اگر قطر ذره‌ی گرانول $175 mm$ و گرانروی (ویسکوزیته‌ی) آن $10^{-2} Pa.s$ در نظر گرفته شود، در سرعت رو به بالای $2.5 mhr^{-1}$ عدد رینولدز حدود ۱/۳ به دست می‌آید. با توجه به قرارگیری مقدار رینولدز در محدوده‌ی جریان آرام، نامساوی $1.8 \times 10^{-5} > 1.72 \times 10^{-5}$ نامساوی $V\gamma - V\rho g > C_D A \rho V^2 / 2$ طرفین نامساوی $V\gamma - V\rho g > C_D A \rho V^2 / 2$ برابر می‌شوند که تعیین‌کننده‌ی بیشترین سرعت رو به بالای قابل اعمال است.^[۱۸] بنابراین مقدار سرعت از جنبه‌ی نظری ممکن است چندین برابر ولی از جنبه‌ی عملیاتی باید به‌مراتب کم‌تر از مقدار حد قرار داده شود تا قابلیت انعطاف بیشتری برای مقابله با نوسانات هیدرولیکی و بارگذاری آلی در سیستم وجود داشته باشد.^[۱۹]

مقطع عبور سیال نسبت به کل سطح چنین محاسبه می‌شود:

$$\frac{[(5x^{\circ}/91) + (2x^{\circ}/5)] 4,8}{11,3x4,8} = 0,41$$

که بیشتر از ۰.۴٪ از مقطع کل سیستم است و قابل قبول است.

سرعت افقی زیر گازگیر

با استفاده از شکل ۶ می‌توان سرعت افقی در زیر گازگیرهای طبقه اول و دوم را محاسبه کرد. توجه داشته باشید که تا سرعت رو به بالای ۱ m/hr شیر تخلیه‌ی لجن آب در مخزن گاز و لجن بسته است و شرایط مشابه واکنشگر معمولی است. در صورت افزایش سرعت، با توجه به یکسان بودن سطح مقطع در منطقه‌ی واکنش و ناحیه‌ی آرامش و باز بودن شیر خروجی واگردانی از مخزن گاز و لجن، تفاضل سرعت رو به بالا در زیر و بالای گازگیر (V) برابر ۱,۸ m/hr خواهد بود. در محاسبات زیر V_1 و V_2 سرعت افقی لحظه‌ی در گازگیر طبقه‌ی اول و دوم، V^* سرعت لحظه‌ی افقی حاصل از عبور جریان رو به بالا از بین گازگیرهای طبقه‌ی اول، V_{1max} و V_{2max} به ترتیب سرعت‌های نهایی در گازگیر طبقه‌ی اول و دوم، فاصله‌ی افقی بین دو گازگیر (b) برابر ۹۱ سانتی‌متر، t عرض هم‌پوشانی برابر ۱ cm، و سطح عمود بر جریان رو به بالا و جریان افقی به ترتیب a_1 و $ah/2$ است.

$$Q = aV = \frac{ah}{2} V_1 \Rightarrow V_1 = \frac{2LV}{h}$$

$$V_{1max} = \frac{2LV}{h} \quad V=1m/hr \quad V_{1max} = \frac{2 \times 4,8 \times 1}{0,825} = 11,64 \text{ m/h}$$

$$\xrightarrow{V=1,8m/hr} V_{1max} = 20,94 \text{ m/hr}$$

$$V_2 = V_{1max} + V_2^* = \frac{2LV}{h} + \frac{2LV}{h} \cdot \frac{b}{a}$$

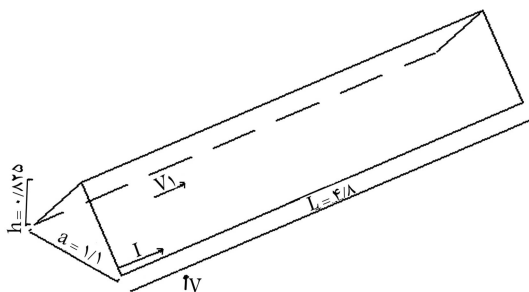
$$V_{2max} = \frac{2LV}{h} \left(1 + \frac{b}{a}\right) \xrightarrow{V=1m/hr} \frac{2 \times 4,8 \times 1}{0,825} \left(1 + \frac{0,91}{1,1}\right) = 21,18 \text{ m/h}$$

$$\xrightarrow{V=1,8m/hr} 38,1 \text{ m/hr}$$

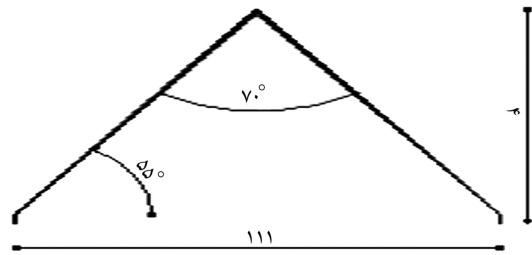
هرچه سرعت افقی در گازگیر بیشتر باشد جداسازی گاز از لجن قبل از ورود به مخزن گاز و لجن بهتر انجام می‌پذیرد. با توجه به این که $b = a - 2t$ ، مقدار V_{2max} چنین محاسبه می‌شود:

$$V_{2max} = \frac{4LV}{h} \left(1 - \frac{t}{a}\right)$$

براین اساس هر قدر L زیاد شود سرعت افقی لجن آب در گازگیر بیشتر می‌شود، ولی چون گازگیر در این طرح باید وزن خود را تحمل کند لذا طول گازگیر نمی‌تواند مطابق



شکل ۶. گازگیر بهینه‌شده و جهت حرکت لجن آب و گاز به مخزن مجاور واکنشگر اصلی.



شکل ۵. مقطع گازگیر.

می‌توان تمام گازگیرها را در دو طبقه بین دیوار طولی و دیوار بین مخزن گازولجن و محفظه‌ی اصلی قرار داد. به منظور انتخاب عرض هر گازگیر با توجه به این که هم‌پوشانی کمینه بین دو طبقه‌ی گازگیر (t) نباید از ۱ cm کم‌تر شود می‌توان نسبت به انتخاب عرض و فاصله‌ی افقی گازگیرها اقدام کرد. اگر فرضاً تعداد گازگیرهای به عرض a در هر طبقه n و طول گازگیر و طول واکنشگر به ترتیب L و B باشد، عرض کل هم‌پوشانی 2nt و مقطع عبور سیال در بین گازگیرها (B - an)L خواهد شد. انتخاب ۰.۴٪ از مقطع کل سیستم برای فاصله‌ی افقی بین گازگیرها مناسب است که پس از طراحی کنترل خواهد شد. میزان شیب سطح بالایی گازگیر باید چنان باشد که لجن ته‌نشین شده روی آن به پایین بلغزد و وارد فرایند تصفیه شود. براین اساس زاویه‌ی شیب را معمولاً بین ۴۵ تا ۶۰ درجه می‌گیرند که پس از طراحی کنترل خواهد شد. با توجه به موارد فوق، عرض ۱۰۰ تا ۱۲۰ سانتی‌متر برای ایستایی گازگیر مناسب به نظر می‌رسد که با توجه به طول واکنشگر، تعداد طبقه‌ی پایینی گازگیر ۶ عدد انتخاب می‌شود. فاصله‌ی گازگیر مجاور دیوارهای عرضی تا دیوار ۵ سانتی‌متر، و هم‌پوشانی ۱۰ سانتی‌متر مناسب خواهد بود (شکل ۲). اگر عرض مقطع گازگیر a و تعداد گازگیر در طبقه‌ی اول n باشد، فاصله‌ی بین دو گازگیر a-2t می‌شود و بنابراین عرض گازگیر برابر ۱۱۱ سانتی‌متر می‌شود:

$$L = na + (n - 1)(a - 2t) + 2 \times 5 =$$

$$(2n - 1)a - 20(n - 1) + 10 = 1130$$

از ورق به طول ۲۰۰ سانتی‌متر که از وسط خم شده می‌توان برای ایجاد این عرض استفاده کرد. برای مقاوم‌کردن لبه‌ی گازگیر نیز می‌توان ۳ سانتی‌متر از لبه‌ی ورق را خم کرد. در این صورت دورریز ورق به علت استاندارد بودن طول ۲ متر به صفر تقلیل می‌یابد و طول شیب گازگیر ۹۷ سانتی‌متر خواهد شد $[(200 - (2 \times 3))/2]$. در این صورت مثلث متساوی‌الساقینی با ساق ۹۷ و قاعده‌ی ۱۱۱ سانتی‌متر خواهیم داشت (شکل ۵) که زاویه‌ی افقی گازگیر α از روی آن محاسبه می‌شود:

$$\alpha = \cos^{-1} \left(\frac{111/2}{97} \right) = 55^{\circ}$$

$$\beta = 180 - 2 \times 55 = 70^{\circ}$$

$$h = [97^2 - (111/2)^2]^{1/2} + 3 = 82,5 \text{ cm}$$

چنان که ملاحظه می‌شود زاویه‌ی افقی گازگیر ۵۵ درجه است که با مفروضات هم‌خوانی دارد.

با توجه به محاسبات فوق تعداد گازگیرها در طبقه‌ی اول ۶ و در طبقه‌ی دوم ۵ عدد خواهد بود. با توجه به عرض ۱۱۱ سانتی‌متر برای قاعده‌ی گازگیر و فاصله‌ی کمینه‌ی ۱ cm در هم‌پوشانی، فاصله‌ی بین گازگیرها ۹۱ سانتی‌متر خواهد بود و

وارد منطقه‌ی آرامش می‌شود، و سرعت رو به بالا در منطقه‌ی واکنشگر را می‌توان مستقل از سرعت در منطقه‌ی آرامش افزایش داد. افزایش سرعت لجن آب در زیر گازگیر از صفر به حدود ۳۸ متر بر ساعت احتمال جدایش گاز از لجن را افزایش می‌دهد. افزایش سرعت رو به بالا در بستر لجن، ضمن افزایش تماس فاضلاب و لجن، موجب افزایش کارایی می‌شود. در طرح پیشنهادی مشکلات استقرار گازگیر از طریق آویزهای عمودی و افقی برای مقابله با نیروهای شناوری گاز، ورود لجن به لوله‌های جمع‌آوری گاز بر اثر خطای اپراتور در تنظیم فشار، و فرار لجن به علت کمبود حجم ذخیره‌ی لجن در زیر گازگیر منتفی است. پاشش فاضلاب به قشر شناور در مخزن گاز و لجن و انتقال لجن آب به پمپ‌خانه و برگشت آن به سیستم عملاً زمان ماند را تا هر قدر که لازم باشد در اختیار ذرات شناور با تجزیه‌پذیری کم قرار می‌دهد. با استفاده از این طرح مشکلات عملیاتی کاهش یافته و از طریق کاهش هزینه‌های سرمایه‌ی و راهبری، سرانه‌ی تصفیه‌ی هر کیلوگرم BOD فاضلاب کاهش می‌یابد.

پانویس

1. upflow anaerobic sludge blanket (UASB)
2. drag
3. biochemical oxygen demand (BOD)
4. sluice

منابع

1. Metcalf and Eddy, Inc. "Wastewater engineering: treatment, disposal and reuse", McGraw-Hill, New York (1991).
2. Singh, K.H. and Riraraghavan, T. "Start-up and operation of UASB reactors at 20°C for municipal wastewater treatment", *Journal of Fermentation and Bioengineering*, **85**, issue 6, pp.609-614 (1998).
3. Behling, E. et. al., "Domestic wastewater treatment using a UASB reactor", *Bioresource Technology*, **61**, Issue 3, pp.239-245, (Sep. 1997).
4. Narnoli, S.K. and Indu M. "Sludge blanket of UASB reactor: Mathematical simulation", *Wat. Res.* **31**(4), pp.715-726 (1997).
5. Hang, S.S. and Byeong, C.P. "Improved performance of upflow anaerobic sludge blanket (UASB) reactors by operating alternatives", *Biotechnol. Lett.*, **12**, pp. 469-474 (1990).
6. Nida, M. ; Grietje Zeeman; Huub Gijzen and Gatze Lettinga. "Solids removal in upflow anaerobic reactors, a review", *Bioresource Technology*, **90**, pp. 1-9 (2003).
7. Wiegant, W.M. "Experiences and potential of anaerobic wastewater treatment in tropical regions". *Water Sci. Technol.* **44**(8), pp. 107-113 (2001).
8. Byung-Uk Bae, Hang-Sik Shin, "Performance of an inner tube-type gas-solid separator device in a UASB reactor", *Bioresource Technology*, **63**, Issue 1, pp. 23-27, (Jan. 1998).
9. Leitao, R.C., et. al., "The effects of operational and environmental variations on anaerobic wastewater treatment systems: A review", *Bioresource Technology*, **97**, Issue 9, pp.1105-1118,(June 2006).

دلخواه زیاد انتخاب شود. همچنین چون t مقدار ثابتی است بنابراین با اضافه کردن a سرعت بیشینه در طبقه‌ی دوم بالا می‌رود؛ ولی با افزایش a به ناچار h نیز زیاد می‌شود و به افزایش ارتفاع منطقه‌ی گازگیرها می‌انجامد، و لذا نمی‌توان a را از یک مقدار منطقی زیاده‌تر کرد.

نتیجه‌گیری

بهبود طراحی گازگیر لجن در سیستم UASB از طریق خارج کردن مقداری از جریان سه‌فازی آب و گاز و لجن از زیر گازگیر و هدایت آن به مخزن تعبیه شده در مجاورت واکنشگر اصلی باعث کاهش مشکلات راهبری و بهبود عملکرد می‌شود. با استفاده از این طرح، مشکل تجمع لجن در زیر گازگیر منتفی شده، میزان لجن شناور کم‌تری

10. Kalyuzhnyi, S.V.; Sklyar, M.A.; Davlyatshina, V.I. and Parshina, S.N. "Organic removal and microbiological features of UASB reactor under various loading rates", *Bioresource Technology*, **55**, pp. 47-54 (1996).
11. Bhatti, Z.I.; Furukawa, K. and Fujita, M. "Comparative composition and characteristics of methanogenic granular sludges treating industrial wastes under different conditions". *J. Ferment. Bioengng*, **79** (3), pp. 273-280 (1995).
12. Fukuzaki, S.; Nishio, N. and Nagai, S. "High rate performance and characterization of granular methanogenic sludges in upflow anaerobic sludge blanket reactors fed with various defined substrates", *J. Ferment. Bioengng*, **79** (4), pp. 354-359 (1995).
13. Harmsen, H.J.M.; Akkermans, A.D.L.; Stams, A.J.M. and de Vos, W.M. "Population dynamics of propionate oxidizing bacteria under methanogenic and sulfidogenic conditions in anaerobic granular sludge", *Appl. Environ. Microbiol.*, **62**(6), pp. 2163-2168 (1996).
14. Olboter, L. and Vogelpohl, A. "Influence of particle size distribution on the dewatering of the organic sludges", *Water Sci. Technol.* **28**(1), pp. 149-157 (1993).
15. Halalsheha, M.; Koppesb, J.; den Elzenb, J.; Zeemanb, G.; Fayyada, M. and Lettingab, G. "Effect of SRT and temperature on biological conversions and the related scum-forming potential", *Water Research*, **39**, pp. 2475-2482 (2005).
16. Batstone, D.J. and Keller, J. "Variation of bulk properties of anaerobic granules with wastewater type", *Wat. Res.* **35** (7), pp. 1723-1729 (2001).
17. Pevere, A.; Guibaud, G.; van Hullebusch, E.; Lens, P. and Baudu, M. "Viscosity evolution of anaerobic granular sludge", *Biochemical Engineering Journal*, **27**, pp. 315-322 (2006).
18. Streeter, Victor L. and Victor Lyle. "Fluid mechanics", McGraw-Hill, New York (1971).
19. Pen, M.R; Marab, D.D. and Avella, G.P. "Dispersion and treatment performance analysis of an UASB reactor under different hydraulic loading rates", *Water Res.*, **40**, pp. 445-452 (2006).