

مقایسه و مشکلات فاضلاب ورودی به کف دستگاه تصفیه‌ی UASB

به صورت ثقلی از بالا و توسط تلمبه از پائین

سید جمال‌الدین هاشمیان (استادیار)

مجید حکیم‌جوادی (مربی)

مرکز تحقیقات آب و انرژی، دانشگاه صنعتی شریف

در این نوشتار، ابتدا به بیان اندازه‌ی سرعت رو به بالا و سپس روش محاسبه‌ی مقدار دبی بیشینه در «دستگاه لایه‌ی لجنی بی‌هوای با جریان روبه بالا» (UASB) می‌پردازیم. پس از آن، تأثیر سرعت در لوله‌های توزیع‌کننده را شرح می‌دهیم و ضمن توضیح روش‌های توزیع، معایب و محاسن هر روش را مورد بحث قرار خواهیم داد. در روش تغذیه از کف، لازم است تعادل مناسبی بین انرژی سینتیک، نیروی لحظه‌ی جریان، افت اصطکاک در طول لوله و افت فشار در حین عبور سیال از سوراخ‌های خروجی وجود داشته باشد. لذا برای پوشش‌دادن به شرایط مذکور، از روابط تجربی استفاده شده و برای یک واکنشگر با سرعت رو به بالای 1 m/hr و مقطع $6 \times 8\text{ m}^2$ تعداد و قطر سوراخ‌ها و جهت پاشش آنها نسبت به افق به دست می‌آید. در روش تغذیه از بالا برای واکنشگر استوانه‌یی با مقطع 72 m^2 و سرعت رو به بالای 1 m/hr ، قطر و افت لوله‌های تغذیه و تعداد سرریزها محاسبه، و از آنجا ارتفاع محفظه بعد از سرریز تعیین می‌شود. سرانجام تجربه‌های عملی به دست آمده از این دو روش با هم مقایسه شده و چنین نتیجه می‌شود که جلوگیری از ورود آشغال درشت، روش تلمبه‌زنی از کف راحت‌تر انجام می‌شود.

مقدمه

برای این که توزیع فاضلاب خام در کف واکنشگر UASB یکنواخت باشد، لازم است تعداد زیادی ورودی جریان (توزیع‌کننده) در کف تعبیه شود. این توزیع‌کننده‌ها معمولاً به دو روش طراحی می‌شود. در روش اول تعدادی لوله‌ی سوراخ‌دار در کف واکنشگر گذاشته می‌شود^[۱] و در روش دوم انتهای هر لوله‌ی ورودی به محل توزیع در کف برده می‌شود. فاضلاب باید مستقیماً به داخل هر خط تلمبه شود. با رعایت فاصله‌ی سوراخ‌ها و نیز فاصله‌ی خطوط لوله می‌توان یکنواخت‌کردن جریان رو به بالا را منظم کرد. در واکنشگرهای UASB دبی فاضلاب ورودی به کف، مجموع دبی فاضلاب ورودی به دستگاه و فاضلاب گردشی است. چون بیشینه‌ی این دبی‌ها نباید سرعت عمودی بیش از 1 m/hr در واکنشگر ایجاد کند، لذا از روی این دبی بیشینه سطح مقطع طراحی شده برای واکنشگر را می‌توان به دست آورد.

هر قدر تعداد توزیع‌کننده‌ها زیاد باشد، جریان رو به بالا یکنواخت‌تر خواهد بود؛ از سوی دیگر زیاد شدن توزیع‌کننده‌ها باعث کم شدن دبی و سرعت در لوله‌های توزیع‌کننده می‌شود. کم شدن سرعت در لوله به ذرات داخل فاضلاب اجازه می‌دهد در لوله رسوب کنند و باعث گرفتگی لوله شوند.^[۲] در طرح تصفیه‌خانه‌ی صنایع نظامی پارچین دو عدد UASB با ظرفیت 400 m^3 پیش‌بینی و اجرا شد که

ورودی آنها به صورت ثقلی از بالا بود. تجربه‌هایی که از پروژه‌های گذشته به دست آمد، نشان داد که توزیع ورودی در $1/5$ تا 2 متر مربع توزیع مناسبی است. با داشتن سطح مقطع واکنشگر می‌توان تعداد توزیع‌کننده را به دست آورده و از روی آن دبی هر توزیع‌کننده را محاسبه کرد. در این نوشتار نحوه‌ی طراحی هر یک از دو روش ارائه شده و با توجه به تجربیات کسب شده از هر روش در چند سال گذشته، مزایا و معایب آنها تشریح، و راه حل‌هایی برای کاهش مشکلات ارائه شده است.

روش‌های توزیع

توزیع‌کننده‌ها در واکنشگرهای UASB ممکن است به دو طریق طراحی شوند: در روش اول فاضلاب از تلمبه‌خانه^۲ به کانال اصلی در قسمت بالایی UASB فرستاده می‌شود (شکل ۱) و از این کانال به محفظه‌هایی که تعداد آنها برابر تعداد توزیع‌کننده در کف است سرریز می‌کند (شکل ۲). یک لوله، فاضلاب را از کف این محفظه به کف UASB و نقطه‌ی مورد نظر انتقال می‌دهد (شکل ۳). مزیت این روش این است که اگر سطح آب در این محفظه بیش از حد معمول بالا بیاید، دلیل بر انسداد لوله‌ی خروجی بعد از این محفظه است و باید با جریان زیاد آب لوله را باز کرد. در روش دوم لوله‌های سوراخ‌داری در لایه‌ی لجن

کف UASB تعبیه می‌شود و فاضلاب از تلمبه‌خانه به این شبکه لوله انتقال می‌یابد. در تصفیه‌خانه‌ی فاضلاب شیر پاستوریزه تهران چهار عدد UASB بتنی با ظرفیت 250 m^3 به این روش طراحی و اجرا شد. در این طرح اگر بعضی از سوراخ‌ها مسدود شود معلوم نخواهد شد، مگر این که این انسداد در تعداد زیادی از سوراخ‌ها صورت گیرد که در آن صورت لوله باید باز شده رفع گرفتگی شود - اگرچه با فشار تلمبه پشت این لوله‌ها، احتمال گرفتگی کم‌تر است.

تغذیه به کف با تلمبه از پایین

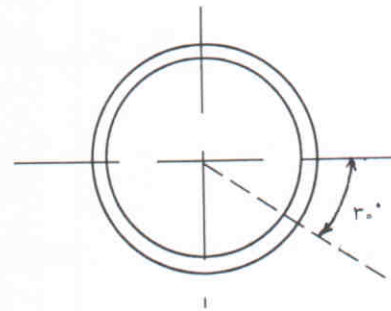
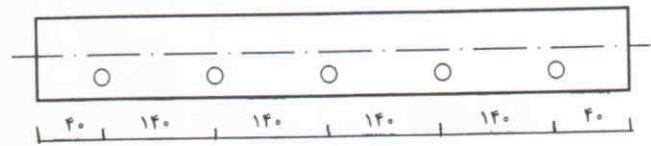
در روش «تغذیه به کف با تلمبه از پایین» از تعدادی لوله سوراخ‌دار استفاده می‌شود^[۴] که معمولاً به تلمبه‌خانه متصل است. برای این که جریان یکنواخت از کف توزیع نسبی شود، می‌توان آن را به وسیله‌ی چند شاخه لوله‌ی سوراخ‌دار به کف سیستم هدایت کرد. در این صورت لازم است بین انرژی سینتیک، نیروی لحظه‌ی جریان، افت اصطکاک در طول لوله و افت فشار در حین عبور سیال از سوراخ‌های خروجی تعادل مناسبی وجود داشته باشد. وقتی که جریان سینتیک و نیروی لحظه‌ی جریان ورودی غالب است، هنگامی که جریان به سوی انتهای بسته‌ی لوله می‌رود مقدار دبی مایع خروجی افزایش می‌یابد. وقتی که افت‌های اصطکاک در امتداد لوله غالب است، در حین عبور جریان به سوی انتهای لوله مقدار دبی کم می‌شود. همچنین زمانی که جریان بالا دست، قبل از ورود به لوله، به وسیله‌ی اتصالی مثل زانویی مغشوش شود، جریان خروجی نزدیک ورودی و انتهای بسته‌ی توزیع‌کننده می‌تواند بیشتر از سوراخ‌های وسط باشد.

با توجه به مطالب فوق، برای محاسبه‌ی این نوع توزیع‌کننده‌ها استفاده از روابط تجربی ضروری است. اگر خطای توزیع جریان کمتر از $\pm 2\%$ قابل قبول باشد، در آن صورت باید نسبت انرژی سینتیک جریان ورودی، E_c ، به افت فشار اطراف سوراخ خروجی، Δh_{o1} ، و افت اصطکاک، Δh_p ، در لوله به افت فشار در اطراف سوراخ خروجی، برابر یا کمتر از $0/1$ باشد. رابطه‌ی زیر را می‌توان برای محاسبه‌ی افت فشار در لوله‌ی سوراخ‌دار به کار گرفت.^[۵]

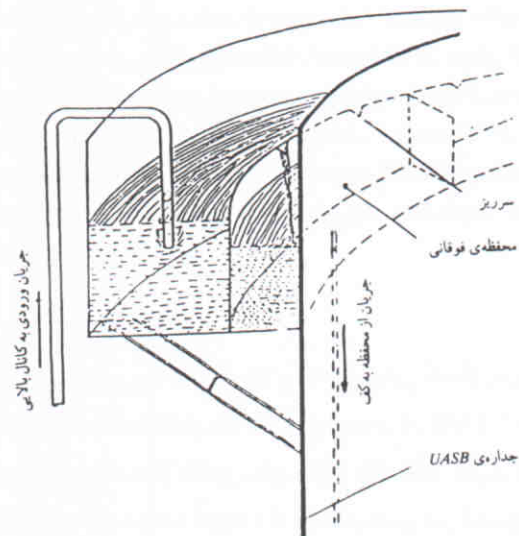
$$\Delta h_p = \left[\frac{4FL}{3D} - \sqrt{\frac{V_i^2}{2g}} \right] \quad (1)$$

$$\frac{\Delta h_p}{\Delta h_{o1}} < 0/1, \quad \frac{E_c}{\Delta h_{o1}} < 0/1$$

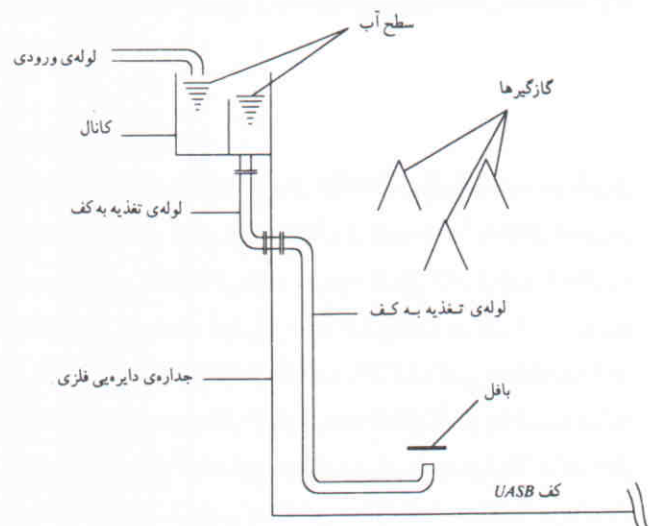
اگر خطای توزیع بین اولین و آخرین سوراخ به صورت درصد بیان شود، می‌توان رابطه‌ی زیر را برای محاسبه‌ی اختلاف هد بین دو طرف سوراخ اول، Δh_{o1} ، به کار برد:



شکل ۱. محل سوراخ‌ها.



شکل ۲. کانال ورودی و محفظه‌ی سریزهای فوقانی UASB.



شکل ۳. تغذیه از بالا.

$$\Delta h_{o1} = \frac{0/00537}{1-0/98^2} = 0/13561 \quad \text{افت دو طرف سوراخ}$$

$$E_c = \frac{\alpha V_i^2}{2g} \quad (3)$$

α در جریان با توزیع سرعت یکنواخت برابر ۱، و در جریان مغشوش برابر ۱/۱ تا ۱/۰۵ است که در اینجا معادل ۱/۰۸ فرض می‌شود.

$$E_c = \frac{1/08 \times 0/473^2}{2 \times 9/81} = 0/01232$$

$$\frac{\Delta h_p}{\Delta h_{o1}} = \frac{0/00537}{0/13561} = 0/04 < 0/1 \quad \text{قابل قبول}$$

$$\frac{E_c}{\Delta h_{o1}} = \frac{0/01232}{0/13561} = 0/09 < 0/1 \quad \text{قابل قبول}$$

$$Q_2 = \frac{Q_1}{5} = \frac{30/1 \times 10^{-4}}{5} = 6/02 \times 10^{-4} m^3/sec$$

$$Q_2 = C A_o \left(\frac{2\Delta P}{\rho} \right)^{1/2} \quad (4)$$

$$C = 0/597 \quad \text{ضریب سوراخ}$$

$$6/02 \times 10^{-4} = 0/597 A_o \left(\frac{2 \times 0/13561 \times 9/81 \rho}{\rho} \right)^{1/2}$$

$$A_o = 6/18197 \times 10^{-4} m^2$$

$$D_o = 2/8 cm = 28 mm$$

جریان بلافاصله قبل از لوله، از شیر یک طرفه و شیر دروازه‌یی عبور می‌کند که سبب تلاطم جریان خواهد شد و در اثر بسته‌بودن انتهایی لوله تمام سیال باقی‌مانده به طرف سوراخ انتهایی منحرف می‌شود. لذا قطر سوراخ وسط $27mm$ و قطر سوراخ‌های اول و آخر $29mm$ انتخاب می‌شود.

به‌منظور تسهیل حرکت لجن، سوراخ‌ها مطابق شکل ۱ به سمت کف قرار داده شده است. همچنین برای توزیع بهتر، سوراخ‌ها یک در میان یکی به سمت چپ و دیگری به سمت راست تعبیه می‌شود. در طرح UASB شیر پاستوریزه‌ی تهران قطر سوراخ لوله‌های تغذیه به کف $27mm$ است. علی‌رغم این که در قسمت ورودی تلمبه‌خانه فیلتری با سوراخ‌های 18 میلی‌متری و در ورودی هر لوله به UASB فیلتری با سوراخ‌های 10 میلی‌متری پیش‌بینی شده بود، رشته‌هایی مثل نخ و نوارهای نازک پلاستیکی، برگ سوزنی کاج و نظیر آنها، از هر دو فیلتر عبور کرده باعث گرفتگی کل لوله شد. از طرفی چون سوراخ‌ها در دو طرف لوله است باعث انباشت گاز در قسمت فوقانی داخل لوله می‌شود

$$100 = \left[1 - \frac{\Delta h_{o1} - \Delta h_p}{\Delta h_{o1}} \right]^{1/2} \quad (2)$$

برای ارائه‌ی روش حل صنعتی و انتخاب شاخه‌ها و سوراخ‌ها، مسئله را در محفظه‌یی با سطح $8 \times 6 m^2$ و دبی $1300 m^3/day$ بررسی می‌کنیم.

معمولاً توزیع یک سوراخ در $2m^2$ توزیع خوبی است

$$A = 6 \times 8 = 48 m^2 \quad \text{سطح کف محفظه‌ی UASB}$$

$$n = \frac{48}{2} = 24 \approx 25 \quad \text{تعداد سوراخ}$$

این سوراخ‌ها را می‌توان در 5 خط، که هر خط دارای 5 سوراخ است توزیع کرد:

$$Q = \frac{1300}{86400} = 15/05 \times 10^{-3} m^3/sec$$

$$Q_1 = \frac{15/05 \times 10^{-3}}{5} = 30/1 \times 10^{-4} m^3/sec \quad \text{دبی یک خط}$$

ابتدا قطر داخلی لوله را 90 انتخاب می‌کنیم، اگر در شرایط قرار نگرفت آن را تغییر می‌دهیم. با توجه به این که تعداد سوراخ‌ها در هر خط 5 عدد است، طول بین دو سوراخ متوالی را $1/2m$ انتخاب می‌کنیم. در این صورت طول بین اولین و آخرین سوراخ $4/8m$ خواهد شد.

$$D = 90 mm$$

$$V_i = \frac{4Q_1}{D^2 \pi} = \frac{4 \times 30/1 \times 10^{-4}}{0/09^2 \pi} = 0/473 m/sec$$

$$R_c = \frac{V_i D}{\nu} = \frac{0/473 \times 0/09}{10^{-6}} = 42570$$

$$\varepsilon = 0/00015 Ft = 4/572 \times 10^{-3} cm$$

$$\frac{\varepsilon}{D} = \frac{4/572 \times 10^{-3}}{9} = 0/508 \times 10^{-3}$$

$$F = 0/0235 \quad \text{عامل اصطکاک لوله}$$

$$L = 4/8 m$$

$$\Delta h_p = \left(\frac{4 \times 0/0235 \times 4/8}{3 \times 0/09} - 1/2 \right) \times$$

افت بین ورودی و انتهایی لوله
اگر درصد خطای قابل قبول برابر 2 باشد:

$$2 = 100 \left[1 - \left[\frac{\Delta h_{o1} - 0/00537}{\Delta h_{o1}} \right]^{1/2} \right]$$

$$0/98^2 = \frac{\Delta h_{o1} - 0/00537}{\Delta h_{o1}}$$

$$Loss = \frac{2/5}{100} \times 13/93 = 0/35 m < 0/4 m$$

بنابراین لوله‌ی $\frac{1}{4}$ انتخاب خوبی است. همچنین برای هر محفظه ۲ سرریز 90° در نظر گرفته می‌شود.

$$Q = 1/38 H^{2/5}$$

$$Q = \frac{72}{72} = 1 m^3/hr$$

$$\frac{1}{3600} = 1/38 H^{2/5}$$

$$H = 0/33 m$$

$$Loss + H = 0/35 + 0/33 = 0/383 m < 0/4 m$$

بنابراین در ارتفاع $0/4$ متری دیواره می‌توان محفظه‌ی سرریز را تعبیه کرد. در طرح $UASB 400 m^3$ تصفیه‌خانه‌ی صنایع نظامی پارچین، علی‌رغم این که پیش‌بینی شده بود لوله‌های گرفته شده را با فشار آب باز کنند، با تغییرات دبی ورودی ارتفاع سطح آب در محفظه‌ی پشت سرریز تغییر می‌کند و اپراتور در بعضی موارد تشخیص صحیحی از گرفتگی لوله ندارد. از طرف دیگر قطعاتی مثل چوب‌های کوچک، قطعات پلاستیکی، کاه و... وقتی در امتداد جریان قرار می‌گیرند به راحتی از لوله عبور می‌کنند. ولی گاهی اتفاق می‌افتد که این قطعات در امتداد عمود بر مسیر جریان واقع می‌شوند و در لوله گیر می‌کنند. در این صورت در ابتدا تغییری در ارتفاع آب پشت محفظه سرریز مشاهده نمی‌شود ولی به تدریج قطعات انعطاف‌پذیر مثل مو، نخ، تار پنبه (فاضلاب صنایع پنبه سفیدکنی وارد این سیستم می‌شود) و غیره به تدریج در پشت قطعه‌ی اولی گیر کرده لوله را مسدود می‌کند که چون مدت گرفتگی زیاد است قسمت گرفته شده به صورت مجموعه‌ی بی‌بافته شده در می‌آید که باز کردن آن معمولاً با مشکل مواجه می‌شود. برای جلوگیری از این مشکلات در این طرح‌ها باید تمهیدات زیر به کار رود:

- الف) اپراتوری باید به‌طور مرتب در فاصله زمانی معقول تمام لوله‌ها (مسدود و باز) را توسط شیلنگ در جریان آب پرفشار قرار دهد.
- ب) چون انسداد در زانوها اتفاق می‌افتد، در طراحی نباید از زانوهای 90° استفاده شود.
- ج) برای این که عبور سیم بکسل برای بازکردن لوله به راحتی انجام شود و عبور قطعاتی مثل کاه آسان‌تر شود، باید از تغییر قطر حتی به مقدار کم در اتصالات، اجتناب کرد.
- د) برای جلوگیری از رسوب دانه‌ها، باید در طراحی لوله‌های افقی به لوله‌های شیب‌دار تبدیل شوند.

بحث

در واکنشگرهای $UASB$ که ورودی از کف انجام می‌شود، معمولاً سوراخ‌ها به سمت بالا قرار داده می‌شود تا ورودی در جهت جریان

که طبق محاسبات مذکور در توزیع جریان بین سوراخ‌ها اختلال ایجاد می‌کند. برای جلوگیری از این اختلال در انتهای هر لوله یک سوراخ 14 میلی‌متری تعبیه شد. انسداد این سوراخ سریع‌تر صورت می‌گیرد. برای رهایی از این مشکلات در این نوع طرح‌ها باید تمهیدات زیر به کار رود:

- الف) انتهای لوله‌ها از دیوار واکنشگر خارج شده، توسط یک شیر به یک هدر وصل و با لوله‌ی به آشغال‌گیر تصفیه‌خانه متصل شود.
- ب) سوراخ هواگیری به جای انتهای لوله در ابتدای لوله تعبیه شود.
- ج) عبور کل جریان واکنشگر فقط از یک لوله صورت گیرد تا آشغال‌های احتمالی در لوله به خارج هدایت شود.
- د) چون برنامه‌ی گرفتگی اتفاقی است و وسیله‌ی برای تشخیص گرفتگی جزئی در این نوع طرح نیست، لذا باید در دستور کار اپراتور قید شود که عمل شستشوی لوله به‌طور هفتگی انجام شود.

تغذیه به کف به صورت ثقلی از بالا

در این روش در بالای واکنشگر $UASB$ محفظه‌هایی ساخته می‌شود و مجموع فاضلاب تغذیه و برگشتی به‌طور یکنواخت و با سرریز به این محفظه‌ها رفته و توسط لوله در کف توزیع می‌شود (شکل ۳). برای روشن شدن موضوع، محاسبات در یک واکنشگر استوانه‌ی با مقطع $72 m^2$ و ارتفاع کل $6 m$ انجام می‌شود.

در واکنشگر $UASB$ سرعت رو به بالا نباید از $1 m/hr$ تجاوز کند. بنابراین دبی بیشینه $72 m^3/hr$ خواهد شد. به‌ازاء هر $2 m^2$ از سطح، یک ورودی در نظر گرفته می‌شود که در این صورت تعداد ورودی‌ها 36 عدد خواهد بود.

$$Q = \frac{72}{36} = 2 m^3/hr$$

دبی در هر لوله

شکل ۲ طرح یک $UASB$ با لوله‌های ورودی ثقلی از بالا را نشان می‌دهد. این لوله از فلانچ زیر محفظه‌ها شروع و از پائین‌ترین قسمت گازگیر وارد استوانه $UASB$ شده و هر یک به مکان تعیین شده می‌روند. چون رنگ‌آمیزی داخل لوله‌ها به علت قطر کم امکان‌پذیر نیست لذا از لوله‌ی پلی‌اتیلن استفاده می‌شود.

اختلاف ارتفاع سطح فاضلاب در داخل استوانه $UASB$ و محفظه‌ی پشت سرریزهای ورودی $0/4 m$ انتخاب می‌شود. واضح است که عبور دبی $2 m^3/hr$ از لوله نباید افت بیش از $0/4 m$ ایجاد کند. ابتدا برای این انتقال لوله‌ی $\frac{1}{4}$ انتخاب می‌شود، سپس قطر آن کنترل خواهد شد. تعداد زانو‌ها ۴ عدد و افت هر یک معادل $3 ft$ لوله است. طول بلندترین لوله با توجه به سطح و ارتفاع واکنشگر $10/28 m$ خواهد بود.

$$L_{eq} = 10/28 + 4 \times 3 \times 0/3048 = 13/93 m$$

ضریب افت برابر $2/5/100 m$ طول لوله است.

هدایت می‌کند. این حرکت ناگهانی احتمالاً باعث ورود مقداری لجن به بالای گازگیر خواهد شد که مطلوب نیست. در طرح شیر پاستوریزه‌ی تهران به‌علت ایجاد اختلاط، حباب‌های گاز ریزتری از لابه‌لای لجن خارج می‌شود و از جریان رو به بالای یکنواخت‌تری برخوردار است. در توزیع به‌صورت ثقلی چون سرعت جریان خروجی را نمی‌توان به اندازه‌ی روش توزیع با تلمبه بالا برد، لذا این روش، اختلاط کمتری در لجن ایجاد خواهد کرد. از طرفی به‌علت سرعت کم در داخل لوله، امکان نشست دانه در کف لوله‌ها وجود دارد. در روش ثقلی اگر یک توزیع‌کننده از کار بیفتد، بلافاصله محفظه‌ی بالای آن پر شده و اپراتور را آگاه می‌کند، ولی در روش تلمبه از کف این امکان وجود ندارد. در عمل نشان داده شد که اگر از ورود آشغال درشت جلوگیری شود و تمهیدات طراحی ذکر شده پیش‌بینی شود روش تلمبه از کف از اپراتوری راحت‌تری برخوردار است.

روبه بالا باشد. در آن صورت یک جریان کوتاه در بالای سوراخ ایجاد خواهد شد. برای جلوگیری از این مشکل، گاهی ورقه‌ی فولادی با قطر تقریبی ۲۰ سانتی‌متر در بالای سوراخ قرار داده می‌شود. در طرح ورود از کف با تلمبه اولاً مشکلات فوق رفع می‌شود، ثانیاً به‌علت جهت جریان که با زاویه‌ی ۳۰° نسبت به کف صورت می‌گیرد، لجن ته‌نشین شده به‌طور دائم تحت تأثیر نیروهای حاصل از جریان قرار می‌گیرد و از محل خود حرکت می‌کند. در اثر این حرکت لجن‌های دورتر جایگزین لجن نزدیک‌تر شده و یک اختلاط دائم در سیستم لجن به وجود می‌آید. این حرکت‌ها خوراک لازم را به‌نحوی مطلوب و به‌طور یکنواخت‌تر به ریزندامگان (میکروارگانیسم) می‌رساند. از سوی دیگر، در این واکنشگرها نقاط کوری به وجود می‌آید که در آنجا لجن نسبتاً ساکن می‌ماند و گاز را در خود حبس می‌کند. پس از مدتی، گاز ناگهان خارج شده و مقادیری لجن را به‌طور ناگهانی به سمت بالا

پانوشتها

1. Up Flow Anaerobic Sludge Blanket (UASB)
2. pumphouse

منابع

1. Lettinga, G. and Hulshoff pol L.W."(UASB-Process design for various types of wastewaters", *Wat. Sci.tech.* **24**(8), pp. 87-107, (1991).

2. Cheng, N.S. "Simplified settling velocity formula for Sediment particles", *J. of Hydraulice Eng., ASCE*, **123**(2), (1997).
3. Rollin, H. Hotchkiss. "Hydrosuction Sediment-Removal-Systems (HSRS): principles and field". *Journal of Hydraulic Engineering*, (june, 1995).
4. Souza, M.E. "Criteria for the utilization, design and operation of UASB reactors", *Wat. Sci. tech.* **18**(12), PP. 55-69, (1986).
5. Perry, R.H. "Chemical Engineers' Handbook", pp. 5-45.