

مروری بر روش‌های کاهش تولید لجن مازاد در سیستم‌های لجن فعال

حسین حضرتی، جلال شایگان*

تهران، دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندسی شیمی و نفت

پیام نگار: shayegan@sharif.edu

چکیده

از جمله مشکلات اصلی سیستم‌های فرایند لجن فعال، لجن مازاد تولیدی تصفیه‌خانه فاضلاب است که عملیات تثبیت و دفع آن بیشترین توجه را به خود معطوف می‌کند. در این تحقیق، انواع روشهایی که می‌توان برای کاهش لجن در سیستم‌های هوایی، بخصوص در سیستم لجن فعال به کار برد، بیان شده که عبارتند از: ۱- زوال و رشد ثانویه آن که شامل تصفیه قلیایی، ازون زدن، کلر زدن و افزایش اکسیژن محلول است. ۲- سوخت و ساز نگهداشت، ۳- سوخت و ساز آنکوپلینگ، ۴- شکارگری باکتریها. همچنین در این تحقیق برای هر کدام از موارد ذکر شده مثالهایی از کارهای انجام شده آورده شده است. در بعضی روشها که عموماً شیمیایی هستند (مانند ازون زدن و افزودن آنکوپلر) مقدار لجن مازاد تا حد صفر کاهش می‌یابد. از این‌رو، بهترین راهکار برای حذف لجن مازاد، روشهای شیمیایی تشخیص داده شده است اگرچه همواره مسائل اقتصادی نیز باید مورد توجه قرار بگیرد.

کلمات کلیدی: فرایند لجن فعال، لجن مازاد، کاهش لجن، ازون زدن، سوخت و ساز آنکوپلر

۱- مقدمه

راهبری و اجرا را در یک تصفیه‌خانه در بر می‌گیرد و سهم عمده‌ای از مشکلات بهره‌برداری، مربوط به این تأسیسات می‌باشد. بر این اساس، باید راهکارهایی اندیشیده شود تا لجن مازاد را بتوان به نحو خوبی مدیریت کرد. حداقل چهار نوع روش برای اداره کردن لجن مازاد می‌توان در نظر گرفت:

- تبدیل لجن مازاد به مواد قابل مصرف یا کربن فعال
- به دست آوردن مواد مفید از لجن، مانند تولید سوخت جایگزین از طریق ذوب کردن لجن یا تفکافت لجن و یا استخراج مواد شیمیایی قابل استفاده از لجن و... (لیو^۱، ۲۰۰۳)
- مدیریت خوب برای دفع لجن (لیو، ۲۰۰۳)
- کاهش تولید لجن مازاد در سیستم‌های تصفیه که بسیار با

فرایند لجن فعال، متداول‌ترین سیستم برای تصفیه فاضلاب‌های شهری و صنعتی در ایران و بسیاری کشورهای دیگر است. فرایند لجن فعال متشکل از حداقل یک مخزن هوادهی و یک مخزن ته‌نشین‌کننده است. مخزن هوادهی، یک راکتور زیستی است که در آن مواد آلی موجود در فاضلاب، بر اثر فعالیت ریزاندام‌ها به دی‌اکسیدکربن، آب و مواد جامد دیگر موجودات جدید، که بیشتر شامل سلول‌های باکتریایی است تبدیل می‌شوند. این مواد جامد در فرایند لجن فعال به نام لجن شناخته می‌شوند که بخش عمده آن را باکتری‌ها تشکیل می‌دهند. امروزه در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب شهری، تأسیسات تثبیت و دفع لجن به مراتب پرهزینه‌تر از سایر واحدهاست، به طوری که وسایل تصفیه و دفع لجن به طور معمول، بین ۴۰ تا ۶۰ درصد هزینه ساخت و ۵۰ درصد هزینه‌های مربوط به

1. Liu, 2003

دهد. این افزایش در عمر لجن منجر به کاهش لجن می‌شود (لیو، ۲۰۰۳).

در این فرایند، دو مرحله‌ی زیر به صورت سری انجام می‌گیرد:

(۱) مرحله‌ی زوال تدریجی

(۲) تجزیه‌ی زیستی^۷

مرحله‌ی کنترل‌کننده در روش زوال و رشد ثانوی، مرحله‌ی زوال (مرحله‌ی اول) می‌باشد، بنابراین با افزایش سرعت زوال، می‌توان میزان لجن تولیدی را کاهش داد. بعلاوه، در صورت تجزیه غیرزیستی رشدمایه‌ی ثانوی و در نتیجه عدم تولید زیست توده بیشتر با استفاده از این رشد مایه، می‌توان تولید لجن را به مقدار بیشتری کاهش داد. روش‌های غیرزیستی که بتوان رشدمایه‌ی ثانوی را تجزیه کرد استفاده از مکانیسم‌های فیزیکی و شیمیایی و یا ترکیبی از این دو می‌باشد؛ مانند:

- تصفیه‌ی قلیایی- گرمایی
- ازون زدن
- کلر زدن
- افزایش اکسیژن محلول و مکانیسم دیگر

۲-۱- تصفیه‌ی (گرمایی- قلیایی)

یکی از روش‌های شکست سلول، روش تصفیه‌ی (گرمایی- قلیایی) است. در تجزیه‌ی (شیمیایی-گرمایی) دیده شده است که بین اسیدها و بازهای مختلف (KOH , NaOH , H_2SO_4)، استفاده از هیدروکسید سدیم بیشترین بازدهی را برای تسریع فرایند زوال سلول‌ها دارا می‌باشد (روچر و همکارانش^۸، ۱۹۹۹). در سال ۲۰۰۱، روچر و همکارانش گزارش کردند که در سیستم‌های لجن فعال همراه با آبکافت (گرمایی- قلیایی) لجن، در دمای ۶۰ درجه‌ی سلسیوس و pH برابر ۱۰، با افزودن هیدروکسید سدیم به مدت ۲۰ دقیقه، می‌توان به بیشینه‌ی کاهش لجن دست یافت، یعنی تولید لجن را به اندازه‌ی ۳۷٪ نسبت به حالتی که فقط از سیستم لجن فعال متعارف استفاده می‌شده است، کاهش داد. همچنین در سال ۲۰۰۲، نی^۹ مشخص کرد که بین ترکیبات قلیایی: Ca(OH)_2 , NaOH , KOH , Mg(OH)_2 ، استفاده از هیدروکسید کلسیم در دمای ۱۰۰ درجه‌ی سلسیوس، pH برابر ۱۰ و

صرفه‌تر از دفع لجن یا هر عمل دیگری می‌باشد (پیشگیری بهتر از درمان است).

همان‌طور که در بالا نیز اشاره شد، یکی از روش‌هایی که مشکل تولید لجن مازاد را در سیستم‌های تصفیه‌ی فاضلاب به سهولت حل می‌کند، کاهش تولید لجن است که در مقایسه با زمانی که پس از تولید لجن، صرف دفع آن می‌شود، آسان‌تر و سریع‌تر و کم‌هزینه‌تر است. بنابراین در بین چهار روش بالا، توسعه‌ی فناوری‌های جدید برای کاهش تولید لجن، ضروری و الزامی است. به طور کلی، فناوری رایج برای کاهش لجن را می‌توان در دو گروه اصلی طبقه‌بندی کرد:

- روش زیستی
- روش‌های فیزیکی- شیمیایی

اما بر اساس یک طبقه‌بندی دیگر که برای کاهش تولید لجن به روش‌های مهندسی توسعه‌یافته است، مکانیسم‌های زیر مطرح می‌باشند:

(۱) زوال و رشد ثانوی^۱

(۲) سوخت و ساز نگهداشت^۲

(۳) سوخت و ساز جداکننده^۳

(۴) شکارگری باکتریها^۴

۲-۲- زوال و رشد ثانوی

در این فرایند، دو نوع سوخت و ساز میکروبی وجود دارد، یکی رشد زیست توده از رشد مایه اصلی^۵ که در واقع همان فرایند تصفیه‌ی فاضلاب و تبدیل مواد آلی به سلول‌های جدید می‌باشد، و دیگری رشد زیست توده از رشدمایه‌ی ثانوی (محصول زوال و فساد سلولی). در این فرایند، رشد زیست توده بوسیله‌ی رشد مایه‌ی ثانوی، به صورت متواتر انجام می‌گیرد که در اصطلاح این دوره را دوره‌ی رشد ثانوی می‌نامند (وی و همکارانش^۶، ۲۰۰۳). چنانچه بتوان این رشدمایه‌ی ثانوی را به طریق دیگری تجزیه کرد در این صورت از رشد زیست توده بر پایه‌ی این رشد مایه جلوگیری می‌شود و در مجموع، تولید زیست توده کاهش پیدا می‌کند. به بیان ساده‌تر می‌توان گفت رشد ثانوی می‌تواند عمر لجن را از طریق خود خوری ریزاندام‌ها افزایش

1. Lysis – Cryptic Growth
2. Maintenance Metabolism
3. Uncoupling Metabolism
4. Predation on Bacteria
5. Original substrate
6. Wei et al, 2003

7. Biodegradation

8. Rocher et. al., 1999

9. Neyens

برای زوال سلول به حساب می‌آید. هنگامی که لجن با ازون در واحد ازون زنی تماس پیدا می‌کند، بیشتر ریزاندام‌ها از بین می‌روند و به مواد آلی اکسیده می‌شوند. شواهدی موجود است که نشان می‌دهد بیش از ۵۰٪ کربن به دست آمده از واحد ازون زنی به آسانی قابل تجزیه می‌باشند (دلریس^۵، ۲۰۰۰) و این دلیلی است بر این نکته که مواد تولید شده در واحد ازون زنی لجن، می‌توانند در تصفیه‌های زیست‌شناختی بعدی، به آسانی تجزیه شوند.

سیستم‌های (لجن فعال - ازون زنی) در مقیاس‌های صنعتی نیز موجود می‌باشند که با بار BOD ورودی روزانه در حدود $550 \left[\frac{\text{kg BOD}}{\text{day}} \right]$ کار می‌کنند و هیچ لجنی هم تولید نمی‌کنند.

مقدار مواد جامد غیر آلی آنها نیز در مخزن هوادهی بسیار ناچیز است، ولی مقدار کربن آلی در پساب خروجی از آنها کمی بیشتر از سیستم‌های لجن فعال تنها می‌باشد (لیو، ۲۰۰۳). در سیستم‌های تصفیه فاضلاب شهری نیز این مورد دیده شده است، به طوری که استفاده از $20 \left[\frac{\text{mg}}{\text{g TS}} \right]$ ازن شدت جریان ورودی $450 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{day}} \right]$

مقدار لجن تولیدی را به صفر می‌رساند (سکایی^۶، ۱۹۹۷). همچنین دیده شده است که در این سیستم‌ها، قابلیت ته‌نشینی لجن بر حسب شاخص حجم لجن^۷، در مقایسه با سیستم‌های لجن فعال معمولی، بهبود بیشتری داشته است (کامیا و هیروتساجی، ۱۹۹۸).

همان‌طور که انتظار می‌رود، هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه و هزینه‌های عملیاتی و اجرایی برای سیستم (لجن فعال - ازون زنی)، به دلیل مصرف زیاد انرژی جهت تولید ازون، بیشتر است، اما در صورتی که هزینه‌های مربوط به آگیری و دفع لجن را نیز مد نظر قرار دهیم، هزینه‌ها به مراتب کمتر از سیستم لجن فعال معمولی خواهد شد (لیو، ۲۰۰۳). فرایند (لجن فعال - ازون زنی)، با اینکه یکی از فناوری‌های کارآمد و مفید برای کاهش تولید لجن مازاد و بهبود قابلیت ته‌نشینی لجن به‌شمار می‌رود، ولی هنوز تمام مشکلات آن برطرف نشده‌اند. ازون یک اکسیدکننده انتخابگر^۸ نیست، بنابراین قابلیت واکنش با هر ماده احیاکننده دیگر حاضر در محیط را نیز دارا می‌باشد، و این ممکن است بازدهی فرایند اکسایش لجن فعال را

مدت ۶۰ دقیقه، بهترین بازدهی برای کاهش لجن به دست می‌آید، ولی در مورد، مقدار کاهش لجن، مطلبی بیان نشده است و با توجه به مقالات روچر و نی می‌توان چنین نتیجه گرفت که در این مورد، کاهش لجن بیشتر از ۳۷٪ است. در مقایسه‌ای که بین تصفیه قلبیایی و پرتوافکنی با پرتوهای گاما برای هیدرولیز لجن صورت گرفته است، مشاهده شده است که مقدار کاهش لجن مازاد در روش تصفیه قلبیایی، ۲۰/۹٪ و در روش آبکافت با پرتوهای گاما، ۱۴/۸٪ بوده است که به خوبی برتری روش قلبیایی را نشان می‌دهد (هان کیم^۱، ۲۰۰۷).

۲-۲ ازون زدن

در این سیستم، لجن حاصل از ته‌نشین‌کننده ثانوی به سیستم ازون زدن فرستاده شده و پس از تماس کامل لجن و ازون، به مخزن هوادهی برگشت داده می‌شود. نتایج، حاکی از آن است که میزان تولید لجن مازاد هنگامی که میزان ازون مصرفی $10 \left[\frac{\text{mg}}{\text{g MLSS}} \right]$ باشد، ۵۰٪ کاهش می‌یابد و اگر این مقدار به بالاتر از

$20 \left[\frac{\text{mg}}{\text{g MLSS}} \right]$ برسد، هیچ لجنی تولید نمی‌شود (کامیا و هیروتساجی^۲، ۱۹۹۸). همچنین مشخص شده است که در شرایط

هوای سرد زمستان، با اضافه کردن $50 \left[\frac{\text{mg}}{\text{g MLSS}} \right]$ ازون به سیستم‌های لجن فعال، مقدار لجن تولیدی را می‌توان به صفر رساند (جی دبیلیو لی^۳، ۲۰۰۵). آزمایش‌های انجام شده در

سال‌های اخیر نشان داده‌اند که با افزودن $125 \left[\frac{\text{mg}}{\text{g TS}} \right]$ ازن تا $2000 \left[\frac{\text{mg}}{\text{g TS}} \right]$ مقادیر TS، TSS و VS، به ترتیب، ۱۵/۴ تا

۸۰/۷ درصد، ۸/۳ تا ۴۷/۹ درصد و ۵/۸ تا ۴۵/۹ درصد، کاهش می‌یابند، یعنی کاهش VS در مقایسه با بقیه کمتر است (موسوی^۴، ۲۰۰۸) و این بدان معنی است که تأثیر ازون بر مواد معدنی بیشتر است. ازون یک اکسیدکننده قوی است که بیشتر در فرایند گندزایی آب مورد استفاده قرار می‌گیرد و یکی از قوی‌ترین عوامل

5. Deleris et al., 2000
6. Sekai, 1997
7. Sludge Volume Index
8. Selective

1. Hunkim, 2007
2. Kamiya and Hirotsuji, 1998
3. J.W.Lee, 2005
4. Moussavi, 2008

کاهش دهد، در حالی که برخی ترکیبات آلی سخت تجزیه پذیر، ممکن است هنوز در محیط حضور داشته باشند که سمیت برخی از این مواد آلی ممکن است در جریان پساب خروجی، مشکلاتی برای دریافت کنندگان پایین دستی ایجاد کنند. همچنین، یکی از مشکلاتی که این فرایند می تواند ایجاد کند، سرعت بالای مصرف اولیه ازن می باشد که حتی در بعضی مواقع ممکن است به

کاهش دهد، در حالی که برخی ترکیبات آلی سخت تجزیه پذیر، ممکن است هنوز در محیط حضور داشته باشند که سمیت برخی از این مواد آلی ممکن است در جریان پساب خروجی، مشکلاتی برای دریافت کنندگان پایین دستی ایجاد کنند. همچنین، یکی از مشکلاتی که این فرایند می تواند ایجاد کند، سرعت بالای مصرف اولیه ازن می باشد که حتی در بعضی مواقع ممکن است به

ضریب سینتیکی Y را از $\left[\frac{\text{mg biomass}}{\text{mg COD}} \right]$ 0.58 به

کاهش 0.3 $\left[\frac{\text{mg biomass}}{\text{mg COD}} \right]$ کاهش می دهد، که این در واقع به معنی کاهش 48% تولید لجن مازاد می باشد، ولی موجب افزایش اندک میزان COD در جریان پساب خروجی می شود (تکدستان^۳، ۲۰۰۸).

۲-۴ افزایش اکسیژن محلول

با بررسی میزان کاهش تولید لجن مازاد با استفاده از بهینه کردن پارامترهای تعیین کننده در فرایند، مشخص شده است که دو پارامتر «بار لجن» و «غلظت اکسیژن محلول» در تولید لجن نقش مهم تری در مقایسه با عوامل دیگر بازی می کنند (عباسی^۴، ۱۹۹۹). در فرایند لجن فعال متعارف، تأمین اکسیژن محلول به واسطه افزایش میزان بار تجهیزات تصفیه، نقش محدود کننده ای دارد. مقایسه نتایج حاصل از فرایند لجن فعال با استفاده از اکسیژن خالص و لجن فعال متعارف، نشان دهنده این مطلب است که رشد محصول دهی در سیستم های اکسیژن خالص، حتی در میزان بارگذاری های بالای لجن نیز تا 54% کاهش پیدا می کند. تولید لجن در سیستم های لجن فعال متعارف و لجن فعال با اکسیژن خالص را با هم مقایسه کردند و دریافتند که در زمان ماند های سلولی مشابه، میزان لجن به دست آمده در سیستم اکسیژن خالص، فقط 60% سیستم متعارف است (مومنی^۵، ۲۰۰۶). همچنین گزارش کرده اند که در صورت افزایش اکسیژن محلول از $1/8 \text{ mg/l}$ به 6 mg/l ، در سیستم لجن فعال متعارف در مقیاس آزمایشگاهی، تولید لجن مازاد از $0.28 \left[\frac{\text{mg MLSS}}{\text{mg BOD}_s} \right]$ به $0.20 \left[\frac{\text{mg MLSS}}{\text{mg BOD}_s} \right]$ کاهش می یابد (عباسی^۶، ۲۰۰۰). ضمناً در تحقیقی دیگر به این نتیجه رسیدند که با افزایش اکسیژن محلول از 0.5 به $4/5$ میلی گرم در لیتر میزان لجن مازاد، در حدود 25% درصد کاهش یافت و محدوده مناسب اکسیژن محلول از نظر خاصیت ته نشینی لجن، میزان 1 تا 3 میلی گرم بر لیتر است و با افزایش اکسیژن محلول به بیش از 3 میلی گرم بر لیتر، خاصیت ته نشینی لجن به شدت کاهش یافت (مومنی، ۲۰۰۶).

۳۰ نیز برسد (دلریس، ۲۰۰۰). باید به این نکته نیز

توجه داشت که کارایی سیستم ازون زنی به ساختار فیزیکی لجن فعال و شرایط عملیاتی سیستم وابسته است، بنابراین برای دستیابی به بازدهی های بالا، نیازمند تعیین میزان بهینه ازون مصرفی خواهیم بود که البته کاری دشوار و زمان گیر است.

۲-۳ کلر زنی

این روش به تازگی برای کاهش میزان لجن مازاد تولیدی، توسعه داده شده است این فرایند (لجن فعال-کلرزنی) نیز تقریباً مشابه فرایند (لجن فعال-ازون زنی) می باشد، یعنی لجن مازاد تولیدی تابعی از میزان کلر مصرفی است. در صورت استفاده از $133 \left[\frac{\text{mg}}{\text{g MLSS.day}} \right]$ کلر، می توان میزان لجن تولیدی را تا 65% در مقایسه با حالتی که از کلر استفاده نمی شود، کاهش داد که این مقدار با مقدار کاهش در سیستم ازون زنی قابل مقایسه است. همان طور که پیشتر هم اشاره شد، در فرایند (لجن فعال-ازون زنی)، قابلیت ته نشینی لجن، بهبود پیدا می کند، در حالی که تأثیر کمتری بر کیفیت خروجی مشاهده می شود، اما در این روش، علاوه بر اینکه قابلیت ته نشینی لجن کاهش می یابد، افزایش چشمگیری نیز در میزان COD محلول در پساب جریان خروجی فاضلاب مشاهده می شود (سابی و همکارانش^۱، ۲۰۰۲). به نظر می رسد که بتوان با استفاده از سیستم های جداسازی غشایی بجای ته نشین سازهای ثانوی متداول، این مشکلات را تا حد زیادی بر طرف ساخت. به طور نمونه، در سیستم راکتورهای بسته متوالی^۲ هوازی با زمان ماند سلولی 10 روز، دیده شده است که افزودن $15 \left[\frac{\text{mg Chlorine}}{\text{g MLSS}} \right]$

3. Takdastan, 2008
4. Abbassi, 1999
5. Momeni, 2006
6. Abbassi, 2000

1 Saby et. al., 2002
2. SBR (Sequenced Batch Reactor)

مسئله را می‌توان بدین صورت توضیح داد که افزایش غلظت اکسیژن محلول در محیط راکتور، باعث نفوذ بیشتر اکسیژن می‌شود و در نتیجه بخش بزرگ‌تری از زیست توده‌ها به صورت هوازی هیدرولیز می‌شوند که منجر به کاهش حجم لجن خواهد شد (مومنی، ۲۰۰۶).

مکانیسم کاهش لجن تولیدی با استفاده از افزایش اکسیژن محلول، هنوز به طور کامل روشن نشده است. به منظور شرح ارتباط اکسیژن محلول با کاهش تولید لجن، «مک ویرتر» در سال ۱۹۸۷ مشخص کرد که غلظت بالای اکسیژن محلول باعث تولید مقدار بیشتری زیست توده^۱ فعال و در نتیجه لجن فعال کمتر خواهد شد. این

جدول ۱- تأثیر روش‌های زوال و رشد ثانوی آن در کاهش تولید لجن

مرجع	تأثیر روی خروجی فاضلاب	درصد کاهش لجن مازاد	شرایط عملیاتی
روچر، ۲۰۰۱		۳۷	تصفیه‌ی قلبیایی-گرمایی با افزودن هیدروکسید سدیم
هان کیم، ۲۰۰۷		۲۰/۹	تصفیه‌ی قلبیایی
لیو، ۲۰۰۳	افزایش در COD	۱۰۰	مقیاس صنعتی- فاضلاب صنعتی با بار $\left[\frac{\text{kg BOD}}{\text{day}} \right]$ با ۵۵۰ ازون $\left[\frac{\text{mg}}{\text{g MLSS}} \right]$ ۵۰
لی، ۲۰۰۵	کمی افزایش در COD	۱۰۰	مقیاس آزمایشگاهی- افزودن $\left[\frac{\text{mg}}{\text{mg SS}} \right]$ ۵۰ ازون در شرایط هوایی سرد
ساکایی، ۲۰۰۷	کمی افزایش در COD	۱۰۰	مقیاس صنعتی- فاضلاب شهری با $\left[\frac{\text{mg}}{\text{mg SS}} \right]$ ۲۰ ازون
کامیا، ۱۹۹۸	بی تأثیر	۵۰	مقیاس آزمایشگاهی- با $\left[\frac{\text{mg}}{\text{g MLSS}} \right]$ ۱۰۰۰ ازون
تکدستان، ۲۰۰۸	کمی افزایش در COD	۱۰۰	مقیاس پایلوتی- با $\left[\frac{\text{mg}}{\text{g MLSS}} \right]$ ۲۲ ازون
سابی، ۲۰۰۲	افزایش زیاد در COD	۶۵	مقیاس آزمایشگاهی- با $\left[\frac{\text{mg}}{\text{g MLSS.day}} \right]$ ۱۳۳ کلر
تکدستان، ۲۰۰۸	افزایش کمی در COD	۴۸	مقیاس آزمایشگاهی- فاضلاب مصنوعی با $\left[\frac{\text{mg}}{\text{g MLSS}} \right]$ ۱۵ کلر

1. Biomas

۳- سوخت و ساز نگهداشت

در طی فرایند تجزیه مواد آلی توسط ریزاندامها، همواره بخشی از انرژی به دست آمده، صرف بقای فعالیت‌های حیاتی خود سلول می‌شود. به این فرایند در اصطلاح، «سوخت و ساز نگهداشت» گفته می‌شود. اولویت ریزاندامها در مصرف انرژی، ادامه فعالیت‌های حیاتی خود آنهاست و سپس به تولید و تکثیر سلول‌های جدید اقدام می‌کنند. علم به این موضوع، باعث دستیابی به روش‌هایی برای کاهش تولید لجن در طی تصفیه زیستی فاضلاب می‌شود. اهمیت «سوخت و ساز نگهداشت» در این مطلب است که می‌توان با کنترل شرایط محیط، مانع تولید سلول‌های جدید شد، یعنی از آنجا که تولید لجن و فعالیت «سوخت و ساز نگهداشت»، معکوس یکدیگر می‌باشند، می‌توان با افزایش فعالیت این سوخت و ساز، تولید لجن را کاهش داد. این کار نیز از لحاظ نظری به این صورت خواهد بود که با افزایش غلظت ریزاندامها در محیط راکتور در شرایط ثابت از نظر تأمین مواد مغذی، در واقع سهم هر یک از ریزاندامها از منابع غذایی کم می‌شود و فقط به آن میزان که برای زنده ماندنشان کافی باشد، مواد مغذی در اختیارشان قرار می‌گیرد. به این ترتیب، ریزاندامها انرژی کافی برای انجام دیگر فعالیت‌های خود در اختیار نخواهند داشت.

با توجه به مکانیزمی که بیان شد، این روش نیز می‌تواند تولید لجن فعال را در فرایندهای هوازی بخصوص در سیستم لجن فعال، کاهش دهد. «چس و لاو»^۱ در سال ۱۹۹۹ نشان دادند که تولید لجن هنگامی که غلظت زیست توده از $1/7 \text{ (mg/l)}$ به $10/3 \text{ (mg/l)}$ افزایش یابد، به میزان ۴۴٪ کم می‌شود. همچنین در تحقیقی دیگر نشان داده شده است که با افزایش زمان ماند سلولی از ۲ روز به ۱۸ روز، تولید لجن مازاد تا ۶۰٪ کاهش می‌یابد، ولی در بازدهی حذف COD هیچ تغییری ایجاد نمی‌شود (مومنی، ۲۰۰۶). نتایج گزارش شده توسط «واندرلیچ»^۲ و همکاران در سال ۱۹۸۵، به طور واضح نشان می‌دهند که در سیستم‌های لجن فعال با اکسیژن خالص، چنانچه زمان ماند سلولی از $3/7$ روز به $8/7$ روز برسد، تولید لجن از $0/38 \left[\frac{\text{mg VSS}}{\text{mg COD}} \right]$ به $0/28 \left[\frac{\text{mg VSS}}{\text{mg COD}} \right]$ کاهش پیدا می‌کند. با وجود این کاهش تولید در لجن مازاد، افزایش غلظت لجن در تهنشین‌ساز ثانوی ناممکن خواهد بود.

۴- سوخت و ساز جداکننده

سوخت و ساز هر موجود را می‌توان به دو مرحله اصلی تقسیم کرد: مرحله تولید انرژی که به نام «کاتابولیسم» شناخته می‌شود و مرحله مصرف انرژی یا مسیر تولید زیست توده‌های جدید که به نام «آنابولیسم» شناخته می‌شود. رشد زیست توده ارتباط نزدیکی با این دو مرحله دارد، بدین صورت که همواره مقداری از انرژی تولید شده، صرف تولید زیست توده‌های جدید می‌شود. لازم به ذکر است که انرژی تولید شده در مرحله «کاتابولیسم»، به صورت پیوندهای پر انرژی در دل ترکیبات آلی خاصی نهفته می‌شود. این ترکیبات که انرژی مصرفی را برای تولید زیست توده فراهم می‌کنند، آدنوزین تری فسفات^۳ می‌باشند، بنابراین اگر ما بتوانیم مقدار تولید این مواد را کاهش دهیم، در واقع تولید زیست توده کاهش می‌یابد.

برای بیشتر باکتری‌های هوازی، آدنوزین تری فسفات بوسیله اکسایش فسفریل‌دار شدن^۴ تولید می‌شود که در این فرایند، الکترون‌ها از یک منبع الکترونی با سطح انرژی بالا (رشدمایه) به پذیرنده الکترون (اکسیژن) انتقال می‌یابند. با توجه به اینکه چنین مکانیسمی، می‌تواند به وسیله منفصل‌کننده‌ها^۵ به طور مؤثرتری مختل شود، افزودن آنها به سیستم، درصد ترکیبات آدنوزین تری فسفات را کاهش می‌دهد و بخش عمده رشدمایه به جای اینکه صرف تولید زیست توده‌های جدید شود، به دی‌اکسیدکربن، اکسیده می‌گردد. بنابراین بازدهی رشد لجن در سیستم‌های لجن فعال شامل منفصل‌کننده، بسیار کم خواهد شد.

منفصل‌کننده‌ها شامل گروه‌های مختلف ساختار مولکولی می‌باشند که همه آنها اسیدهای ضعیف چربی‌دوست هستند (لیو، ۲۰۰۳). تاکنون از بیشتر این اسیدها در سیستم‌های لجن فعال برای کاهش تولید لجن استفاده شده است، مانند نیتروفنول، کلروفنول، تتراکلرو سالیسیلیند^۶، ۴، ۲ تری‌کلرو فنول^۷، کربنیل سیانید پارا تری‌فلوئورومتوکسی پنی‌هیدرازین، متیل فنول، آمینوفنول و سایر اسیدها (لاو و چس، ۱۹۹۸). درمورد اندازه‌های آزمایشگاهی راکتورهای لجن فعال پیوسته، لاو و همکارانش^۸ در سال ۲۰۰۰ میلادی گزارش کرده‌اند که تولید زیست توده‌ها، هنگامی که

3. Adenosine triphosphate
4. phosphorylation
5. Uncoupler
6. TCS
7. TCP
8. Low et. al., (2000)

1. Low, Chace
2. Wunderlich

کشت گلوکوز، (mg/l) ۲۰ باشد، مقدار Y به اندازه قابل توجهی (۸۷٪) کاهش می‌یابد، ولی بازدهی حذف رشدمایه تنها ۱۳/۲٪ افت می‌کند (یانگ^۴، ۲۰۰۳).

در مورد این فرایند، ذکر این نکته نیز لازم است که از این روش در مقیاس‌های صنعتی نیز استفاده شده است، ولی باید توجه داشت که بیشتر منفصل‌کننده سوخت و سازها، برای محیط‌زیست مضر می‌باشند. در بین اینها، تتراکلروسالیسالیند بی‌ضررتر و با محیط‌زیست سازگارتر است، بنابراین، برای کاهش تولید لجن، بیشتر از این ماده استفاده می‌شود.

این روش نیز مانند بسیاری از روش‌های دیگر، مشکلات مخصوص به خود را دارد. در این فرایند، مصرف اکسیژن بسیار بیشتر از روش‌های دیگر است، به طوری که تخمین زده شده است که سرعت مصرف اکسیژن، پس از افزودن منفصل‌کننده سوخت و سازها، با ضریب ۵۰ افزایش می‌یابد (لیو، ۲۰۰۳).

پارانیتروفنول^۱ در غلظت‌های پایین به محیط کشت میکروبی اضافه شود، ۴۹٪ و در غلظت (mg/l) ۱۰۰، ۷۷٪ کاهش یافت ولی بازدهی حذف رشدمایه از ۹۶٪ به ۶۸٪ رسید در حالی که در صورت استفاده از غلظت‌های بالای (mg/l) ۱۲۰، هیچ لجنی تولید نخواهد شد (لاو و چس، ۱۹۹۸).

برای زمانی که غلظت تتراکلرو سالیسالیند در محیط کشت میکروب (mg/l) ۰/۸ باشد، نسبت به حالتی که هیچ تتراکلرو سالیسالیندی به محیط کشت افزوده نشود، بیش از ۴۰٪ کاهش می‌یابد، بدون اینکه هیچ اثر خاصی در بازدهی حذف رشدمایه داشته باشد (چن و همکارانش^۲، ۲۰۰۲). در تحقیقی دیگر نیز با استفاده از دی‌نیتروفنول با غلظت (mg/l) ۵ در محیط کشت میکروبی، مشاهده شد که مقدار ضریب سینتیکی Y در حدود ۲۱٪ کاهش یافت، ولی بازدهی حذف رشدمایه همچنان ۹۳٪ باقی ماند (وی^۳، ۲۰۰۸). و در موردی دیگر نیز نشان داده شد که اگر غلظت کلروفنول در محیط

جدول ۲- تاثیر منفصل‌کننده‌های مختلف در کاهش تولید لجن مازاد

مرجع	تأثیر در خروجی	درصد کاهش Y	نوع رشدمایه	غلظت (mg/l)	منفصل‌کننده اضافه شده
وی، ۲۰۰۸	بی تاثیر	۲۱	ساکاروز	۵	دی نیترو فنول
مای هیو ^۵ ، ۱۹۹۸	بی تاثیر	۲۹	فاضلاب	۳۵	دی نیترو فنول
یانگ، ۲۰۰۳	کمی افزایش (۱۳/۲٪)	۸۶/۹	گلوکوز	۲۰	متا کلرو فنول
یانگ، ۲۰۰۳	کمی افزایش (۸/۹٪)	۵۸	گلوکوز	۲۰	پاراکلروفنول
یانگ، ۲۰۰۳	کمی افزایش	۶۵/۵	گلوکوز	۲۰	متا نیترو فنول
یانگ، ۲۰۰۳	کمی افزایش	۸۶/۱	گلوکوز	۲۰	ارتو نیترو فنول
لاو و چس، ۱۹۹۸	کمی افزایش	۱۰۰	گلوکوز	۱۲۰	پارا نیترو فنول
چن و همکارانش، ۲۰۰۲	بی تاثیر	۴۶	گلوکوز	۱	تتراکلروسالیسالیند
چن و همکارانش، ۲۰۰۲	بی تاثیر	۴۲	گلوکوز	۳/۶	تتراکلروسالیسالیند

1. PNP
2. Chen et. al., 2002
3. Wei, 2008
4. Yang, 2003
5. Mayhev, 1998

۵- شکارگری باکتریها

لجن مورد استفاده در فرایند تصفیه فاضلاب، تنها شامل چند گونه محدود از ریزاندام‌های متداول نیست، بلکه انواع مختلفی از میکروبوها و باکتری‌ها در آن نقش ایفا می‌کنند که به کمک برخی از آنها می‌توان فرایند کاهش لجن را نیز تشدید کرد. یک روش برای کاهش تولید لجن، عملکرد موجودات بزرگ‌تر مانند پروتوزوا^۱ ها و متروام^۲ ها در فرایند لجن فعال است، به طوری که با شکار کردن باکتری‌ها، زمانی که تجزیه رشدمایه تمام شد، جمعیت آنها را کاهش می‌دهند. در طی فرایند مصرف غذا توسط باکتری‌ها، در واقع واکنش اکسایش است که رخ می‌دهد. در جریان این فرایند، سطح انرژی مواد آلی که به عنوان غذا مصرف می‌شوند، کاهش می‌یابد و مقداری از انرژی آزاد شده در این بین، با تبدیل شدن به زیست توده‌های ناکارآمد، تلف می‌شود، بنابراین تحت شرایط بهینه، می‌توان با به حداکثر رساندن اتلاف انرژی، شرایط را برای حداقل شدن تولید زیست توده فراهم کرد (آلیباردی^۳، ۲۰۰۸).

مهم‌ترین کرم‌هایی^۴ که در سیستم‌های لجن فعال و صافی‌های چکنده وجود دارند، عبارتند از: آلووسومیت دائی^۵، نای دی دائی^۶، پرستینا^۷، درو^۸ و توبیفیل سدائی^۹. اما عمومی‌ترین آنها که در سیستم‌های لجن فعال بیشتر ظاهر می‌شوند عبارتند از آلووسومیت دائی و نای دی دائی. آلووسوما همپریک^{۱۰} یکی از انواع آلووسومیت دائی‌ها می‌باشد که حضور آن در سیستم‌های لجن فعال، باعث کاهش مقدار لجن در حدود ۳۹ تا ۶۵ درصد می‌شود (لی یانگ^{۱۱}، ۲۰۰۶). لازم به ذکر است که مقدار این نوع کرم‌ها در F/M کمتر از

$$\left[\frac{\text{mg COD}}{\text{mg VSS day}} \right] 0.7$$

بودند و در هر F/M مختلف به در صد کاهش لجن معینی، در محدوده ای که بیان شد، منتهی می‌شوند. سرعت کاهش لجن بر واحد وزن آلووسوما همپریک، در حدود

$$\left[\frac{\text{mg VSS}}{\text{mg A.Hemprichi}} \right] 0.53$$

اندازه‌گیری شده است. وجود آلووسوما همپریک، در عین حال که هیچ تأثیری بر COD پساب خروجی ندارد، برای ته‌نشینی لجن نیز سودمند است (لی یانگ، ۲۰۰۶). ذکر این نکته نیز می‌تواند مقید باشد که لی یانگ در سال ۲۰۰۵ اثبات کرده است که از بین چهار شکارگر آلووسوما همپریک، دافنیا مگنا^{۱۲}، توبی فکس^{۱۳} و فیسا آکوتا^{۱۴} که همگی از دسته‌ی میکروفاوناس^{۱۵} ها است، آلووسوما همپریک، دارای بیشترین سرعت کاهش لجن، یعنی $\left[\frac{\text{mg Sludge}}{\text{mg Microfaunans}} \right] 0.8$ است که در مقایسه با سه مورد دیگر، یعنی $\left[\frac{\text{mg Sludge}}{\text{mg Microfaunans}} \right] 0.18$ ، $\left[\frac{\text{mg Sludge}}{\text{mg Microfaunans}} \right] 0.54$ و $\left[\frac{\text{mg Sludge}}{\text{mg Microfaunans}} \right] 0.1$ ، به طور قابل توجهی بیشتر است.

۶- نتیجه‌گیری

نظر به اینکه هزینه‌های دفع لجن حدود ۵۰٪ هزینه‌های کل تصفیه خانه فاضلاب را شامل می‌شود، کاهش تولید لجن بهترین راهکار برای حل این مشکل است. در بین روش‌های ریزبست‌شناختی^{۱۶} و شیمیایی که برای کاهش تولید لجن بیان شد، روش‌های شیمیایی بهترین بازدهی را برای کاهش تولید لجن از خود نشان داده‌اند بویژه با روش‌های ازون زنی و سوخت و ساز منفصل‌کننده در کاهش تولید لجن به بازدهی ۱۰۰٪ هم می‌توان رسید که حتی در حال حاضر در مقیاس صنعتی نیز در حال بهره برداری می‌باشد. مزیت دیگر روش‌های شیمیایی، کنترل آسان و انعطاف پذیری آنهاست. این سیستم‌ها، که مهم‌ترین آنها روش‌های ازون زنی است، هزینه سرمایه‌گذاری اولیه زیادی دارند بنابراین باید برای دستیابی به هزینه‌های بهینه، بررسی‌های کامل‌تری صورت گیرد.

1. Protozoa
2. Metazoam
3. Alibardi, 2008
4. Worm
5. Aeolosomitidae
6. Naididae
7. Pristina
8. Dero
9. Tubificidae
10. Aeolosoma hemprich
11. Liang, 2006

12. Daphnia magna
13. Tubifex
14. Physa Acuta
15. Microfaunas
16. Microbiological

- [1] Liu, Y., "Chemically reduced excess sludge production in the activated sludge process", *hemosphere* 50, 1–7, (2003).
- [2] Rocher, M., Roux, G., Goma, G., Pilas-Begue, A., Louvel, L., Rols, J.L., "Excess sludge reduction in activated sludge processes by integrating biomass alkaline heat treatment", *Water Sci. Technol.* 44, 437–444, (2001).
- [3] Neyens, E., Baeyense, J., Creemers, C., 2003. "Alkaline thermal sludge hydrolysis", *Journal of Hazardous Materials B97*, 295–314, (2003).
- [4] Tae-Hun Kim, Tak-Hyun Kim, Seungho Yu, Youn Ku Nam, Dong-Kyu Choi, Sang Ryul Lee, and Myun-joo Lee, "Solubilization of Waste Activated Sludge with Alkaline Treatment and Gamma Ray Irradiation", *J. Ind. Eng. Chem.*, Vol. 13, No. 7, 1149–1153, (2007).
- [5] Kamiya, T., Hirotsuji, J., "New combined system of biological process and intermittent ozonation for advanced wastewater treatment". *Water Sci. Technol.* 38, 145–153, (1998).
- [6] J.W. Lee, H.-Y. Cha, K.Y. Park, K.-G. Song, K.-H. Ahn, "Operational strategies for an activated sludge process in conjunction with ozone oxidation for zero excess sludge production during winter season", *Water Research* 39, 1199–1204, (2005).
- [7] Moussavi, G., Asilian, H., Jamal, A., "Effect of Ozonation on Reduction of Volume and Mass of Waste Activated Sludge", *Journal of Applied Sciences Research*, 4(2): 122–127, (2008).
- [8] Deleris, S., Paul, E., Audic, J.M., Roustan, M., Debellefontaine H. "Effect of ozonation on activated sludge solubilization and mineralization", *Ozone Sci. Eng.* 22, 473–486, (2000).
- [9] Saby, S., Djafer, M., Chen, G.H., "Feasibility of using a chlorination step to reduce excess sludge in activated sludge process", *Water Res.* 36, 656–666, (2002).
- [10] Takdastan, A., Mehrdadi, N., Azimi, A.A., Torabian, A., Nabi Bidhendi, G., "Investigation of Intermittent Chlorination System in Biological Excess Sludge Reduction by Sequencing Batch", *Iran. J. Environ. Health. Sci. Eng.*, Vol. 6, No. 1, pp. 53–60, (2009).
- [11] B. Abbassi, S. Dullstein and N. Rae Bige, "Minimization of Excess Sludge Production by Increase of Oxygen Concentration in Activated Sludge Flocs; Experimental and Theoretical Approach", *Wat. Res.* Vol. 34, No. 1, pp. 139±146, (1999).
- [12] Momeni, A., Mirbagheri, A., "Minimization of Excess Sludge in Activated Sludge Systems", *Water and wastewater*, number 56, (1384).
- [13] Low EW, Chase HA, "The effect of maintenance energy requirements on biomass production during wastewater treatment", *Water Res* 33:847–853, (1999).
- [14] Chen, G.H., Mo, H.K., Saby, S., Yip, W.K., Liu, Y., "Minimization of activated sludge production by chemical stimulated energy spilling". *Water Sci. Technol.* 42, 189–200, (1999).
- [15] Rocher, M., Goma, G., Pilas-Begue, A., Louvel, L., Rols, J.L., "Towards a reduction in excess sludge production in activated sludge processes: biomass physicochemical treatment and biodegradation." *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 51, 883–890, (1999).
- [16] Sakai Y, Fukase T, Yasui H, Shibata M. "An activated sludge process without excess sludge production." *Water Sci Technol*; 36(11):163–70, (1997).
- [17] Alibardi, L., "Innovative Treatment of Tannery Sludge", data consegna tesi 31 gennaio (2008).
- [18] Low, E.W., Chase, H.A., "The use of chemical uncouplers for reducing biomass production during biodegradation." *Water Sci. Technol.* 37, 399–402, (1998).
- [19] Low, W.W., Chase, H.A., Milner, M.G., Curtis, T.P., "Uncoupling of metabolism to reduce biomass production in the activated sludge process" *Water Res.* 34, 3204–3212, (2000).
- [20] Chen, G.H., Mo, H.K., Liu, Y., "Utilization of a metabolic uncoupler, 3,30,40,5-tetrachlorosalicylanilide (TCS) to reduce sludge growth in activated sludge culture" *Water Res.* 36, 2077–2083, (2002).
- [21] Wei, G., Yu, H., Xi, P., Xu, D., "Modeling the yield of activated sludge in the presence of 2,4-dinitrophenol", *Biochemical Engineering Journal* 40, 150–156, (2008).
- [22] Yang, X., Xie, M., Liu, Y., "Metabolic uncouplers reduce excess sludge production in an activated sludge process" *Process Biochemistry* 38, 1373/1377, (2003).
- [23] Y.S. Wei, H.R.T. Van, A.R. Borger, et al., "Minimization of excess sludge production for biological wastewater treatment", *Water Res.* 37, 4453–4467, (2003).
- [24] Peng Liang, Xia Huang, Yi Qian, "Excess sludge reduction in activated sludge process through predation of *Aeolosoma hemprichi*", *Biochemical Engineering Journal* 28, 117–122, (2006).
- [25] Peng Liang, Xia Huang, Yi Qian, Yuansong Wei, Guoji Ding, "Determination and comparison of sludge reduction rates caused by microfaunas predation", *Bioresource Technology* 97, 854–861, (2006).
- [26] M. Mayhew, T. Stephenson, "Biomass yield reduction: is biochemical manipulation possible without affecting activated sludge process efficiency", *Water Sci. Technol.* 38, 137–144, (1998).