



بررسی پارامترهای موثر در تشکیل لجن گرانوله واحد هوازی

مژده نادری، سید شهاب بنی طبا، نگین صفی خانی

۱- کارشناس فنی شرکت پیوند آب سپاهان

۲- کارشناس ارشد فنی شرکت پیوند آب سپاهان

۳- کارشناس فنی شرکت پیوند آب سپاهان

Negin119safi@gmail.com

چکیده

لجن گرانوله هوازی (Aerobic Granular Sludge - AGS) یک فناوری نوین در تصفیه فاضلاب است که با تشکیل دانه های زیستی متراکم، عملکرد بهتری نسبت به روش های معمول لجن فعال ارائه می دهد. این سیستم دارای مزایایی از جمله کاهش فضای مورد نیاز، بهره وری بالاتر در حذف مواد آلی و مغذی، و کاهش هزینه های عملیاتی است. تشکیل گرانول های هوازی تحت تأثیر عوامل متعددی مانند غلظت مواد مغذی، نرخ هوادهی و شرایط هیدرودینامیکی قرار دارد. در این مطالعه، تأثیر دما به عنوان یکی از پارامترهای محیطی بر روند تشکیل لجن گرانوله در آزمایشگاه شرکت پیوند آب سپاهان بررسی و نتایج حاکی از افزایش ۳۰ درصدی تراکم لجن های فعال و افزایش سرعت ته نشینی لجن می باشند.

کلمات کلیدی: لجن گرانوله هوازی، لجن فعال، مدیریت پساب، توسعه پایدار، دما، AGS

۱-مقدمه

با افزایش رشد جمعیت و توسعه صنعتی، تولید فاضلاب شهری و صنعتی به یکی از چالش های اساسی در مدیریت منابع آبی تبدیل شده است. روش های مرسوم تصفیه فاضلاب، مانند لجن فعال متعارف، به دلیل نیاز به فضای زیاد، مصرف بالای انرژی و مشکلات مربوط به ته نشینی لجن، در برخی موارد ناکارآمد هستند. در این راستا، فناوری لجن گرانوله هوازی (Aerobic Granular Sludge - AGS) به عنوان یک جایگزین نوین و کارآمد مورد توجه قرار گرفته است.

لجن گرانوله هوازی شامل تجمع میکروارگانیسم ها در ساختاری کروی و متراکم است که به طور طبیعی تحت شرایط خاصی در سیستم های تصفیه شکل می گیرد. این ساختار ظرفیت بالایی در حذف آلاینده ها دارد و باعث بهبود ته نشینی، افزایش کارایی فرآیند تصفیه و کاهش مصرف انرژی می شود. به دلیل ویژگی های خاص این نوع لجن، امکان حذف مؤثر آلاینده های آلی، نیتروژن و فسفر بدون نیاز به مرحله ته نشینی جداگانه فراهم می شود.



یکی از مهم ترین مزایای AGS، کاهش نیاز به فضای تصفیه خانه و افزایش پایداری سیستم در برابر تغییرات بار آلودگی است. همچنین، عدم نیاز به مرحله ته نشینی ثانویه و امکان عملکرد همزمان فرآیندهای بیولوژیکی مختلف، این فناوری را به گزینه ای جذاب برای تصفیه فاضلاب تبدیل کرده است. با این حال، کنترل نحوه تشکیل و پایداری گرانول ها و شوک های بارگذاری از جمله چالش های کلیدی در پیاده سازی این سیستم هستند.

با توجه به اهمیت تولید لجن گرانوله و استفاده از آن در فرآیندهای بیولوژیکی تصفیه فاضلاب تحقیقات زیادی در این زمینه انجام شده است. اولین تلاش ها برای توسعه لجن فعال گرانوله در سیستم های بیولوژیکی در دهه ۱۹۸۰ میلادی انجام شد. در این دوره، عمده تحقیقات مربوط به فرآیندهای بیولوژیکی در سیستم های بی هوازی و توسعه لجن های گرانوله برای تصفیه فاضلاب های صنعتی بود. مورگنروث و همکاران (۱۹۹۷) در مورد تشکیل لجن های گرانوله هوازی در راکتورهای سوسپانسیونی و سیستم های بیوراکتوری (SBR) تحقیقات زیادی انجام داده اند. آنها دریافتند که در شرایط خاص، لجن های گرانوله به طور طبیعی و خودبه خود شکل می گیرند و می توانند با ویژگی های ویژه ای نظیر توانایی بالا در تصفیه مواد آلی و نیتروژن، کارایی بالاتری نسبت به لجن فعال معمولی داشته باشند. در اواخر دهه ۱۹۹۰ میلادی، فناوری لجن فعال گرانوله برای تصفیه فاضلاب های هوازی مورد استفاده قرار گرفت. در این دهه، بسیاری از تحقیقات به توسعه و بهبود شرایط عملیاتی و فنی برای تولید لجن های گرانوله هوازی متمرکز شد. در دهه ۲۰۰۰ مطالعات مختلفی نشان داد که عوامل مختلفی مانند سرعت هوادهی، زمان نشست، ترکیب بستر، و نرخ بار آلی می توانند بر فرآیند تشکیل لجن فعال گرانوله تأثیر گذار باشند. همچنین، تأثیر دما و pH محیط نیز در این دهه مورد بررسی قرار گرفت. در این دوره، استفاده از تکنیک های نوین تصویربرداری مانند میکروسکوپ های لیزری و سایر روش های تحلیلی برای بررسی ساختار میکروبی گرانول ها انجام شد. در دهه ۲۰۱۰، تحقیقات در رابطه با کاربردهای گسترده تر لجن فعال گرانوله در تصفیه فاضلاب های صنعتی و شهری و همچنین کاربردهای محیط زیستی مانند تجزیه آلاینده های سمی و بازیافت مواد معادن متمرکز شد. علاوه بر این، مفهوم "سایز گرانول" و ویژگی های فیزیکی و شیمیایی گرانول ها به طور خاص مورد مطالعه قرار گرفت. در دهه ۲۰۲۰ و بعد از آن، با استفاده از پیشرفت های جدید در زمینه مهندسی زیست شناسی، مواد جدید و بهبود روش های تصفیه فاضلاب، شاهد نوآوری های زیادی در زمینه لجن فعال گرانوله بوده ایم. با توجه به بیشینه تحقیقاتی در زمینه لجن گرانوله کشورهای مختلفی از جمله هلند، آلمان، فرانسه، چین، ژاپن، کره جنوبی و استرالیا تاکنون رشد چشمگیری در این زمینه داشته و به صورت گسترده در تصفیه خانه مورد استفاده قرار می دهند.

۱-۱-هدف از تولید لجن گرانوله هوازی

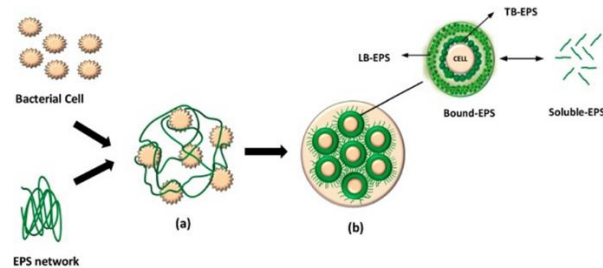
- هدف از تولید لجن گرانوله فعال بهبود کارایی فرآیندهای تصفیه فاضلاب می باشد. اهداف اصلی تولید لجن گرانوله فعال عبارتند از:



- **افزایش سرعت ته نشینی:** لجن گرانوله به دلیل ساختار فشرده و متراکم خود، سرعت ته نشینی بیشتری نسبت به لجن فعال معمولی دارد. این ویژگی به بهبود فرآیند جداسازی جامدات از مایع کمک کرده و باعث کاهش زمان لازم برای ته نشینی می شود.
- **بهبود کارایی در تصفیه فاضلاب های پر بار آلی:** لجن گرانوله فعال در بار آلی بالا مواد آلی را بهتر از لجن فعال تجزیه می نماید. از این رو لجن فعال گرانوله عملکرد بهتری جهت کنترل تغییرات بار آلی در واحد های تصفیه فاضلاب دارد.
- **افزایش ثبات و پایداری فرآیند:** لجن گرانوله در برابر شوک های محیطی از جمله PH و تغییرات دما پایداری بیشتری داشته و مانع از تغییرات کیفی خروجی فاضلاب می گردد.
- **کاهش حجم لجن:** لجن گرانوله به دلیل ساختار فشرده خود، حجم کمتری نسبت به لجن فعال معمولی تولید می کند. از این رو فضا لازم جهت انباشت لجن کاهش می یابد.
- **افزایش توانایی حذف نیتروژن و فسفر:** لجن گرانوله فعال عملکرد بهتری در فرآیندهای حذف نیتروژن و فسفر از فاضلاب ها را دارد.
- **بهبود کارایی در تصفیه فاضلاب های سمی یا حاوی مواد سمی:** لجن گرانوله می تواند به طور مؤثرتر در برابر مواد سمی و آلاینده های خاص مقاومت کند. این ویژگی به ویژه در فاضلاب های صنعتی و محیط هایی که آلاینده های سمی وجود دارد، حائز اهمیت است.
- **کاهش نیاز به افزودنی های شیمیایی:** در بسیاری از سیستم های لجن فعال معمولی، نیاز به افزودنی های شیمیایی مانند کواگولانت ها یا فلکولانت ها برای تسهیل ته نشینی و بهبود عملکرد وجود دارد. در سیستم هایی که از لجن گرانوله فعال استفاده می کنند، نیاز به این افزودنی ها کاهش می یابد.

۱-۲- مکانیزم های گرانوله نمودن لجن هوازی

- ۱-۲-۱- **تجمع میکروبی:** در اثر تجمع میکرواورگانیزم ها لجن اولیه گرانوله تشکیل می گردد.
- ۱-۲-۲- **مواد پلیمری خارج سلولی EPS: EPS)** نقش حیاتی در فرآیند گرانوله شدن ایفا می کنند و به عنوان یک عامل چسبنده عمل کرده و پیوستگی درون گرانول ها را تضمین می کنند. (شکل ۱)



شکل ۱- مواد پلیمری خارج سلولی (EPS)

۱-۲-۳- دسترس پذیری مواد مغذی و pH: دسترس پذیری مواد مغذی (کربن، نیتروژن، فسفر) و pH سیستم به طور قابل توجهی بر رشد و تجمع میکروبی تأثیر می گذارند.

۱-۲-۴- نیروهای برشی: نیروهای هیدرودینامیک برشی، مانند شدت هوادهی، به تشکیل گرانول های متراکم و فشرده کمک می کنند.

۱-۲-۵- دسترسی پذیری مواد مغذی و PH: دسترس پذیری مواد مغذی (کربن، نیتروژن، فسفر) و pH سیستم به طور قابل توجهی بر رشد و تجمع میکروبی تأثیر می گذارند.

۱-۳-۳- شرایط موثر در تولید لجن گرانوله

شرایط محیطی موثر در تولید لجن گرانوله عبارتند از:

۱-۳-۱- شرایط دما

دمای مناسب برای رشد و تشکیل لجن گرانوله فعال معمولاً در محدوده ۱۵ تا ۳۰ درجه سانتی گراد است. دماهای بالاتر یا پایین تر می توانند به رشد و شکل گیری گرانول ها آسیب برسانند و همچنین فعالیت میکروبی را کاهش دهند.

۱-۳-۲- میزان اکسیژن (DO)

سطح اکسیژن محلول (DO) در سیستم باید به گونه ای تنظیم شود که به رشد میکروارگانیسم های هوازی کمک کند. معمولاً مقدار DO در حدود ۲ تا ۴ میلی گرم در لیتر برای فرآیندهای گرانوله سازی مناسب است. سطوح اکسیژن پایین تر ممکن است باعث کاهش فعالیت میکروبی و کاهش تشکیل گرانول ها شود.



۱-۳-۳- غذا و مواد مغذی (سبک تغذیه)

میکروارگانیسم های گرانوله نیاز به مواد غذایی برای رشد دارند. این مواد معمولاً شامل کربن، نیتروژن، فسفر و سایر مواد مغذی مورد نیاز برای رشد میکروبی هستند. ترکیب صحیح این مواد می تواند به شکل گیری گرانول های فعال کمک کند. تغذیه بیش از حد یا کمبود مواد مغذی می تواند بر کیفیت گرانول ها تاثیر منفی بگذارد.

۱-۳-۴- نسبت F/M

نسبت F/M (Food to Microorganism) یکی از پارامترهای کلیدی در فرآیندهای بیولوژیکی است. این نسبت به میزان مواد غذایی (مثل کربن) نسبت به تعداد میکروارگانیسم ها اشاره دارد. جهت تولید لجن گرانوله فعال، این نسبت باید در محدوده ۰.۱ تا ۰.۳ کیلوگرم COD/کیلوگرم میکروب در روز قرار گیرد.

۱-۳-۵- ویژگی های مکانیکی و فیزیکی

در فرآیند گرانول سازی، شرایط همزن و حرکت در راکتور نیز بسیار مهم است. حرکت یا اختلاط باید به گونه ای باشد که میکروارگانیسم ها بتوانند به صورت گرانول های بزرگ و فشرده ایجاد گردند. به همین دلیل، سرعت جریان و همزدن باید به گونه ای تنظیم شود که از پراکندگی و شکستن گرانول ها جلوگیری نماید.

۱-۳-۶- PH

PH نیز یکی از پارامترهای مهم در فرآیند تشکیل گرانول ها می باشد. PH مناسب معمولاً در محدوده ۶.۵ الی ۸ می باشد.

۱-۳-۷- زمان ماند هیدرولیکی (HRT)

زمان ماند هیدرولیکی (Hydraulic Retention Time - HRT) به مدت زمانی اطلاق می شود که فاضلاب در راکتور می ماند. این پارامتر تأثیر زیادی بر روی رشد میکروارگانیسم ها و تشکیل گرانول ها دارد. زمان ماند مناسب به گونه ای باید انتخاب شود که میکروارگانیسم ها به اندازه کافی رشد نمایند.

۱-۳-۸- دوره های بهره برداری

در برخی موارد، تولید لجن گرانوله به گونه ای است که باید دوره های بهره برداری متناوب یا طولانی مدت در نظر گرفته شود تا گرانول ها به تدریج رشد کنند و به ویژگی های مطلوب برسند.

۱-۴- مقایسه لجن گرانوله هوازی و لجن فعال

دو فناوری لجن گرانوله هوازی (AGS) و لجن فعال (CAS) از پرکاربردترین روش های تصفیه فاضلاب محسوب می شوند. لجن گرانوله هوازی یک ساختار زیستی کروی و متراکم است که در شرایط کنترل شده شکل می گیرد، در حالی که لجن

فعال از فلاک های نامنظم و سبک تشکیل شده که در سیستم های هوادهی رشد می کنند. این دو روش دارای تفاوت های ساختاری، عملکردی و عملیاتی متعددی به شرح جدول ذیل می باشند (جدول ۱) تحقیقات زیادی در کشورهای مختلف در خصوص تفاوت لجن فعال و گرانوله انجام شده است از جمله (M.Sarvajith-2024) لجن فعال و گرانوله از لحاظ ساختاری در زمان های مختلف بررسی نموده که نتایج نشان دهنده قطر بیشتر ذرات لجن در دوره های زمانی یکسان نسبت به لجن فعال و همچنین افزایش سرعت ته نشینی و کاهش زمان ته نشینی در لجن گرانوله را نشان داده است.

جدول ۱ - مقایسه کلی لجن گرانوله هوازی و لجن فعال

ویژگی	لجن فعال (CAS)	لجن گرانوله هوازی (AGS)
شکل و ساختار	فلاکولنت، پراکنده	کروی، متراکم، فشرده
قطر ذرات (mm)	۰.۰۵-۰.۲	۰.۲-۵
چگالی (g/cm^3)	پایین (۱.۰۰ - ۱.۰۲)	بالا (۱.۰۲ - ۱.۰۶)
سرعت ته نشینی (m/h)	۰.۵-۲	۵-۲۰
نیاز به ته نشینی ثانویه	دارد	ندارد
کارایی حذف مواد آلی	متوسط	بالا
حذف همزمان نیتروژن و فسفر	نیاز به واحدهای مجزا	دارد
مقاومت در برابر شوک آلودگی	پایین	بالا
مصرف اکسیژن و انرژی	بیشتر	کمتر
تولید لجن مازاد	زیاد	کم



نیاز به تجهیزات اضافی	بیشتر (حوضچه های بزرگ تر)	کمتر (سیستم ساده تر)
هزینه های عملیاتی	بالا	پایین
انعطاف پذیری در تغییرات بار آلودگی	کم	زیاد

۲- مواد و روش ها

با توجه به مطالعات گسترده شرکت فنی مهندسی پیوند آب سپاهان در زمینه تصفیه فاضلاب بهداشتی و صنعتی، جهت تولید لجن گرانوله هوازی تصفیه خانه ای در جنوب اصفهان با مشخصات جدول ۱ انتخاب گردیده است. روش تصفیه مورد نظر در این تصفیه خانه، لجن فعال بوده و روزانه حدود ۲۰۰ کیلوگرم لجن آبیگری شده از این تصفیه خانه خارج می گردد. جهت افزایش راندمان تصفیه خانه پس از انجام چندین نمونه آزمایش در شرایط محیطی مختلف، این شرکت موفق به تولید لجن گرانوله با ویژگی هایی بالاتر از لجن فعال شده است. به منظور شبیه سازی تصفیه خانه از دو عدد مخزن شیشه ای به ابعاد ۰.۳*۰.۴*۰.۵ متر استفاده شده است. مراحل انجام آزمایش به شرح ذیل می باشد. (شکل ۲)

۱- دو مخزن شیشه ای از فاضلاب تصفیه خانه مورد مطالعه پر شده است.

۲- ۳۰ درصد از حجم یکی از مخزن های شیشه ای از مدیا معلق (مطابق با درصد پر شدگی تصفیه خانه مورد نظر) پر شده است. (جهت جلوگیری از فرار مدیاها از یک توری فلزی استفاده شده است)

۳- از یک عدد پمپ کولر به منظور چرخش فاضلاب از مخزن اول به مخزن دوم استفاده شده است.

۴- از یک عدد پمپ هوا آکوارיום به منظور هوادهی لجن به منظور رشد میکرواورگانیزم ها استفاده شده است.

۵- شرایط محیطی مورد نظر مطابق با شرایط استاندارد تصفیه خانه بوده است.

۶- مشخصات کیفی فاضلاب ورودی شامل $MLSS = 260 \text{ ppm}$ ، $TDS = 76 \text{ ppm}$ و دبی تصفیه خانه ۱۵۰۰ مترمکعب در شبانه روز می باشد.



شکل ۲- پایلوت ایجاد شده در آزمایشگاه شرکت فنی مهندسی پیوند آب سپاهان

۳- بحث و نتایج:

نمونه فاضلاب مورد نظر در سه شرایط دمایی مختلف مورد مطالعه قرار گرفته است.

۳-۱-۲۰ درجه سانتیگراد

با ایجاد دمای ۲۰ درجه سانتیگراد در محیط آزمایشگاه فاضلاب منتخب به مدت ۳ روز هوادهی شده که پس از مدت مورد نظر مقداری لجن مطابق با شکل ۳ بر روی مדיاها تشکیل شده است. لازم به ذکر است لجن تشکیل شده دارای پایداری مناسبی نمی باشد.



شکل ۳- تشکیل لجن گرانوله در شرایط دمایی ۲۰ درجه سانتی گراد

۳-۲-۳۰ درجه سانتی گراد

با ایجاد دما ۳۰ درجه سانتی گراد در آزمایشگاه و تمامی شرایط مذکور در آزمایش ۱ میزان توده لجن گسترده تری بر روی مדיاها تشکیل شده است. (شکل ۴)



شکل ۴- تشکیل لجن گرانوله در شرایط دمایی ۳۰ درجه سانتی گراد

۳-۳-۳- دما ۳۵ درجه سانتی گراد

در این آزمایش میزان لجن تولید شده بیشتر و توده لجن متراکم تر می باشد. (شکل ۵)



شکل ۵- تشکیل لجن گرانوله در شرایط دمایی ۳۵ درجه سانتی گراد

۴- نتیجه گیری

فناوری لجن گرانوله هوازی (AGS) روشی نوین و کارآمد در تصفیه فاضلاب است که با افزایش سرعت ته نشینی، کاهش مصرف انرژی و حذف همزمان مواد آلی، نیتروژن و فسفر، جایگزین مناسبی برای روش های سنتی مانند لجن فعال محسوب



می شود. این سیستم به دلیل انعطاف پذیری بالا، کاهش تولید لجن مازاد و کاهش هزینه های عملیاتی، مزایای زیست محیطی و اقتصادی چشمگیری دارد.

با توجه به آزمایشات انجام شده در آزمایشگاه شرکت فنی مهندسی پیوند آب سپاهان تاثیر دما بر تولید لجن گرانوله هوازی مورد مطالعه قرار گرفته و طبق نتایج به دست آمده تراکم لجن تشکیل شده با افزایش دما از ۲۰ درجه سانتی گراد به ۳۵ درجه سانتی گراد حدود ۳۰ درصد افزایش یافته است. همچنین اندازه ذرات لجن نیز افزایش یافته است.



۵-مراجع

- Y. Liu & J. H. Tay. (2001). **The Granulation Process of Aerobic Granular Sludge**. Water Science and Technology, 43(6), 1-9.
- Y. Liu & J. H. Tay. (2002). **Aerobic Granulation in Sequencing Batch Reactors**. Water Research, 36(14), 3507-3516.
- X. Li & Y. Liu (2007). **Aerobic Granulation and its Application in Wastewater Treatment**. Environmental Technology Reviews, 6(1), 30-45.
- B.S. McSwain, et al. (2004). **Characterization and Applications of Aerobic Granular Sludge**. Water Environment Research, 76(7), 54-67.
- M. Sarvajith & Y.V. Nancharaiah ‘ **Aerobic granular sludge with granular activated carbon for enhanced biological phosphate removal from domestic wastewater**’ CURRENT SCIENCE, VOL. 127, NO. 5, 10 SEPTEMBER 2024