دانشگاه اصفهان

دانشکده عمران و حمل و نقل

گروه مهندسی عمران – مهندسی محیط‌زیست

رآکتور بی‌هوازی پتوی لجن جریان رو به بالا

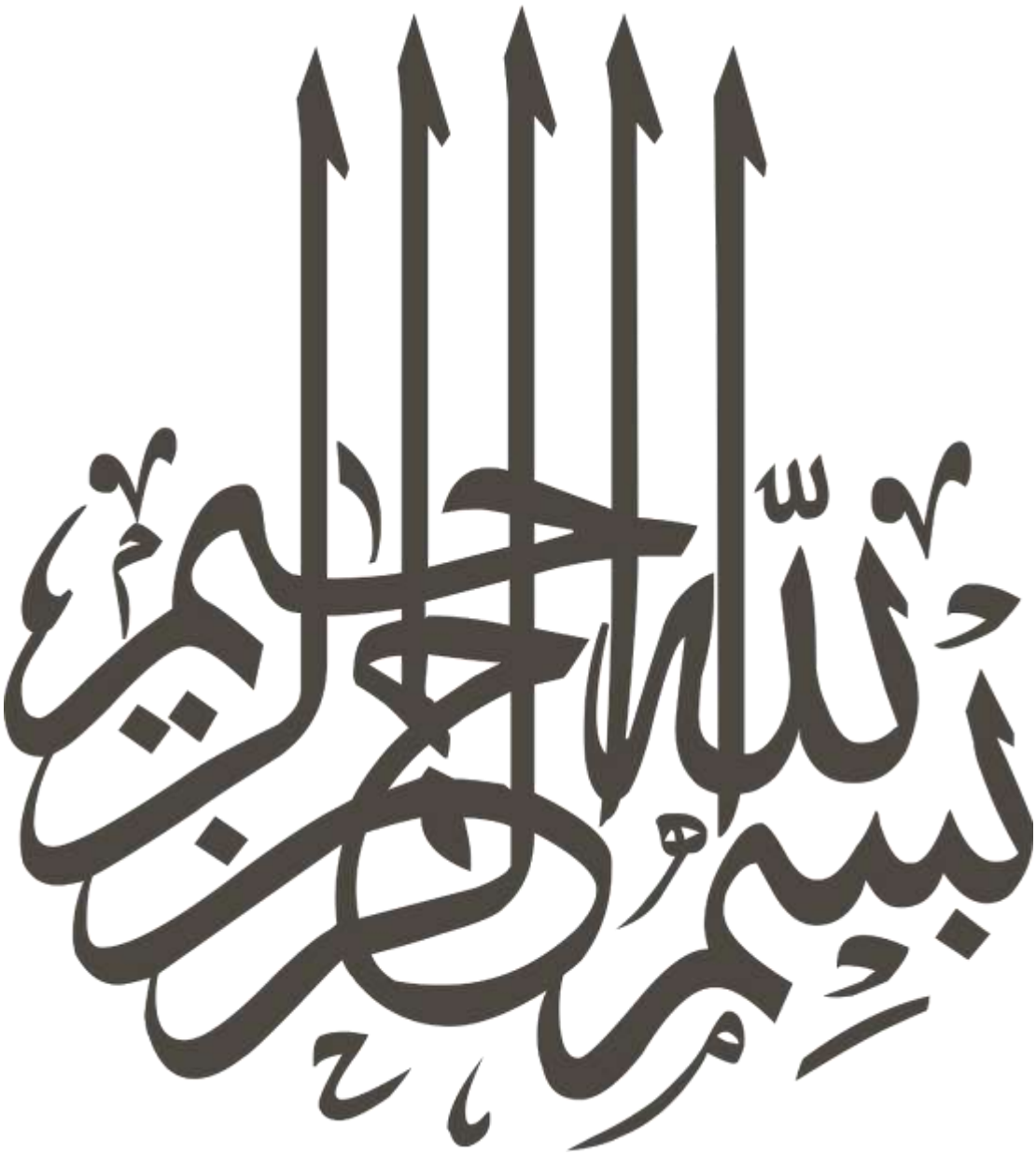
استاد:

دکتر علی دهنوی

دانشجو:

مهندس کیوان ارسطو

بهمن ماه ۱۴۰۱


بسم الله الرحمن الرحيم

چکیده

رآکتور بی‌هوازی پتوی لجن جریان رو به بالا، توسط رشد معلق و تشکیل یک لایه زیست‌توده به نام پتوی لجن بالاتر از بستر لجن در کف مخزن، مواد هضم‌پذیر موجود در فاضلاب را تجزیه می‌کند. زمان ماند متوسط در این رآکتور بین ۴ تا ۲۰ ساعت بسته به دما و شرایط تعیین می‌شود. این سیستم برای رسیدن به ظرفیت نهایی هضم خود به دوره راه‌اندازی اولیه بین ۴ تا ۶ ماه زمان نیاز دارد. اگرچه در صورت تغذیه سیستم با لجن به اندازه ۴٪ حجم رآکتور، زمان راه‌اندازی اولیه به ۲ تا ۳ هفته نیز کاهش می‌یابد. این رآکتور به دلیل زیست‌توده موجود در تانک، زمان راه‌اندازی مجدد کوتاهی پس از یک وقفه موقت دارد. سرعت متوسط جریان رو به بالا در این رآکتور بسته به دبی ورودی جریان بین ۰/۵ تا ۱/۵ متر بر ساعت می‌باشد؛ هرچند در دوره راه‌اندازی جهت کاهش خروج جامدات از رآکتور، حداکثر سرعت ۰/۴ متر بر ساعت پیشنهاد می‌شود. درصد حذف نهایی این سیستم برای شاخص (BOD) بین ۸۵٪ تا ۹۰٪ می‌باشد.

فهرست مطالب

عنوان شماره صفحه

فصل اول کلیات

۱- ۱- مقدمه ۱

۱- ۱- ۱- شبکه فاضلاب ۲

۱- ۱- ۲- ترکیبات فاضلاب ۳

۱- ۱- ۳- اثر تخلیه فاضلاب بر روی محیط ۳

۱- ۲- تعاریف، فرمول‌های شیمیایی و رابطه‌ها ۴

۱- ۳- معرفی ۷

فصل دوم رآکتور بی‌هوازی جریان رو به بالا

۲- ۱- مقدمه ۸

۲- ۲- رآکتور بی‌هوازی پتوی لجن جریان رو به بالا ۹

۲- ۲- ۱- رآکتور بی‌هوازی پتوی لجن جریان رو به بالا همراه با جداکننده سه فاز غوطه‌ور ۱۱

۲- ۲- ۲- رآکتور بی‌هوازی پتوی لجن جریان رو به بالا همراه با جداکننده سه فاز شناور ۱۱

۲- ۳- فرآیند تصفیه در رآکتور بی‌هوازی پتوی لجن جریان رو به بالا ۱۲

۲- ۳- ۱- شاخص‌های تصفیه در رآکتور بی‌هوازی پتوی لجن جریان رو به بالا ۱۵

۲- ۴- اصول طراحی در رآکتور بی‌هوازی پتوی لجن جریان رو به بالا ۱۹

۲- ۴- ۱- ضوابط طراحی در رآکتور بی‌هوازی پتوی لجن جریان رو به بالا ۲۱

۲- ۵- انواع دیگر رآکتورهای بی‌هوازی پتوی لجن جریان رو به بالا ۲۵

۲- ۵- ۱- رآکتور بی‌هوازی پتوی لجن دانه‌ایی گسترده ۲۵

۲- ۵- ۲- رآکتور بی‌هوازی همراه با بازچرخانی داخلی ۲۷

۲- ۵- ۳- رآکتور بی‌هوازی همراه با بازچرخانی خارجی، غشا و مدیا فیلتر ۲۸

۲- ۵- ۴- سیستم‌های رآکتور مرکب و هیبرید ۲۹

۲-۵-۴-۱- راکتور بی‌هوازی پتوی لجن جریان رو به بالا همراه با فیلترهای بی‌هوازی ۲۹

۲- ۵- ۴- ۲- رآکتور بی‌هوازی پتوی لجن جریان رو به بالا همراه با برکه‌های پاکسازی ۲۹

۲- ۵- ۴- ۳- رآکتور بی‌هوازی پتوی لجن جریان رو به بالا همراه با سیستم روانآب سطحی ۳۰

۲-۵-۴-۴- رآکتور بی‌هوازی پتوی لجن جریان رو به بالا همراه با صافی چکنده ۳۱

۲- ۵- ۴- ۵- رآکتور بی‌هوازی پتوی لجن جریان رو به بالا همراه با بیوفیلتر هوازی غوطه‌ور ۳۲
۲-۵-۴-۶- رآکتور بی‌هوازی پتوی لجن جریان رو به بالا همراه با لجن فعال ۳۲
۲- ۵- ۵- کیفیت پساب و راندمان حذف در سیستم‌های رآکتور مرکب ۳۳
۲- ۶- شرایط و هماهنگی متناسب با رآکتور بی‌هوازی پتوی لجن جریان رو به بالا ۳۵
۲- ۷- جنبه‌های سلامت و بهداشت در رآکتور بی‌هوازی پتوی لجن جریان رو به بالا ۳۵
۲- ۸- بهره‌برداری و نگهداری از رآکتور بی‌هوازی پتوی لجن جریان رو به بالا ۳۶
۲- ۹- مزایا و معایب رآکتور بی‌هوازی پتوی لجن جریان رو به بالا ۳۸
۲- ۱۰- نتیجه‌گیری ۳۹
منابع ۴۰

فهرست شکل‌ها

عنوان شماره صفحه

شکل ۱-۱ تصویر شماتیک از سیستم مدیریت فاضلاب در محل ۲
شکل ۱-۲ تصویر شماتیک از سیستم مدیریت فاضلاب خارج از محل..... ۲
شکل ۱-۳ تعدادی از سیستم‌های تصفیه بی‌هوازی فاضلاب ۷
شکل ۲-۱ تصویر شماتیک از رآکتور بی‌هوازی پتوی لجن جریان رو به بالا ۸
شکل ۲-۲ تصویر شماتیک از جداسازی سه فاز در رآکتور بی‌هوازی پتوی لجن جریان رو به بالا ۱۰
شکل ۲-۳ تصویر شماتیک از جداکننده سه فاز غوطه‌ور و تانک تراز هیدرولیکی ۱۱
شکل ۲-۴ تصویر شماتیک از جداکننده سه فاز شناور ۱۲
شکل ۲-۵ راندمان حذف در رآکتور بی‌هوازی پتوی لجن جریان رو به بالا بر اساس زمان ماند ۱۵
شکل ۲-۶ وابستگی متقابل غلظت اسید استیک و محیط اسیدی ۱۷
شکل ۲-۷ نسبت تشکیل آمونیا به آمونیوم بر اساس دما و محیط اسیدی ۱۷
شکل ۲-۸ رآکتور بی‌هوازی پتوی لجن جریان رو به بالا با مقطع‌های مختلف ۱۹
شکل ۲-۹ تصویر شماتیک از موقعیت سه فاز در رآکتور بی‌هوازی پتوی لجن جریان رو به بالا.....۲۰
شکل ۲-۱۰ تصویر سه بعدی از رآکتور با جریان ورودی فاضلاب از بالا و شبکه توزیع آن در کف مخزن ۲۱
شکل ۲-۱۱ راندمان حذف در دوره گرم برای رآکتور بی‌هوازی پتوی لجن جریان رو به بالا ۲۴
شکل ۲-۱۲ راندمان حذف در دوره سرد برای رآکتور بی‌هوازی پتوی لجن جریان رو به بالا ۲۵
شکل ۲-۱۳ تصویر شماتیک از رآکتور بی‌هوازی پتوی لجن دانه‌ایی گسترده ۲۶
شکل ۲-۱۴ مقایسه بار آلی حجمی بر اساس دما برای دو رآکتور بی‌هوازی ۲۶
شکل ۲-۱۵ تصویر شماتیک از رآکتور بی‌هوازی همراه با بازچرخانی داخلی ۲۷
شکل ۲-۱۶ تصویر شماتیک از رآکتور بی‌هوازی همراه با بازچرخانی خارجی، غشا و مدیا فیلتر ۲۸
شکل ۲-۱۷ راکتور بی‌هوازی پتوی لجن جریان رو به بالا همراه با فیلترهای بی‌هوازی ۲۹
شکل ۲-۱۸ رآکتور بی‌هوازی پتوی لجن جریان رو به بالا همراه با برکه‌های پاکسازی.....۳۰
شکل ۲-۱۹ رآکتور بی‌هوازی پتوی لجن جریان رو به بالا همراه با سیستم روانآب سطحی ۳۱
شکل ۲-۲۰ رآکتور بی‌هوازی پتوی لجن جریان رو به بالا همراه با صافی چکنده ۳۱
شکل ۲-۲۱ رآکتور بی‌هوازی پتوی لجن جریان رو به بالا همراه با بیوفیلتر هوازی غوطه‌ور ۳۲
شکل ۲-۲۲ رآکتور بی‌هوازی پتوی لجن جریان رو به بالا همراه با لجن فعال ۳۲

فهرست جدول‌ها

عنوان **شماره صفحه**

جدول ۱-۱ تعدادی از آلاینده‌های اصلی، منشا و بیشترین آثار ناشی از آن‌ها بر روی منابع آبی ۱
جدول ۱-۲ اثر متقابل در ایجاد تعادل اکسیژن محلول ۳
جدول ۱-۳ تعاریف ۴
جدول ۱-۴ فرمول‌های شیمیایی.....۶
جدول ۱-۵ رابطه‌ها.....۶
جدول ۲-۱ اثر زمان ماند و سرعت عمودی جریان بر روی راندمان حذف در رآکتور بی‌هوازی.....۱۴
جدول ۲-۲ شاخص‌های مهم بهره‌برداری از رآکتور بی‌هوازی پتوی لجن جریان رو به بالا ۱۸
جدول ۲-۳ سرعت پیشنهادی جریان رو به بالا برای طراحی رآکتور بی‌هوازی ۲۱
جدول ۲-۴ زمان ماند هیدرولیکی پیشنهادی برای رآکتور بی‌هوازی پتوی لجن جریان رو به بالا ۲۲
جدول ۲-۵ معیارهای طراحی برای رآکتور بی‌هوازی پتوی لجن جریان رو به بالا ۲۳
جدول ۲-۶ کیفیت پساب خروجی از رآکتور بی‌هوازی پتوی لجن جریان رو به بالا و مرکب ۳۳
جدول ۲-۷ متوسط راندمان حذف در رآکتور بی‌هوازی پتوی لجن جریان رو به بالا و مرکب ۳۴
جدول ۲-۸ تابلو و نشانه‌های مورد نیاز بر روی سیستم استحصال زیست‌گاز ۳۶
جدول ۲-۹ سرانه ویژگی‌های رآکتور بی‌هوازی پتوی لجن جریان رو به بالا ۳۷

فصل اول
کلیات

۱- ۱- مقدمه

به مواد و یا شکل‌های انرژی مازاد که بصورت مستقیم و غیرمستقیم، پیکره آبی را به خطر بیاندازند، آلودگی آب گفته می‌شود. مطابق جدول (۱-۱)، تعدادی از آلاینده‌های اصلی معرفی شده‌اند [۱].

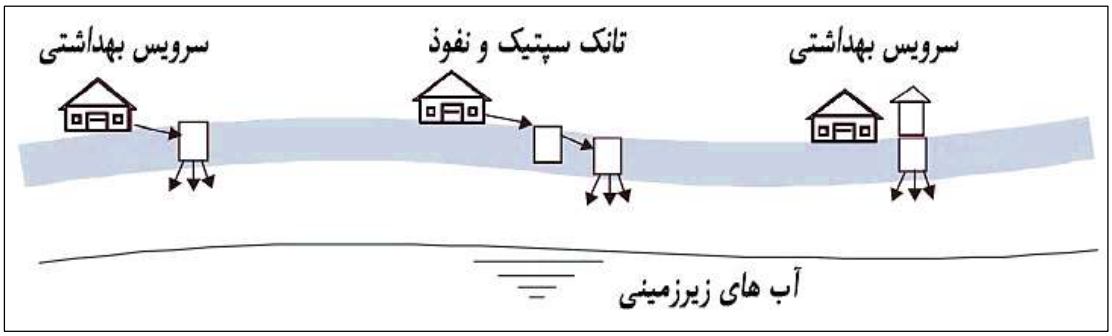
جدول ۱-۱ تعدادی از آلاینده‌های اصلی، منشا و بیشترین آثار ناشی از آن‌ها بر روی منابع آبی [۱]

آلودگی	شاخص	منبع				آثار و پیامدها
		فاضلاب		روانآب		
		خانگی	صنعتی	شهری	کشاورزی	
جامدات معلق	TSS	***	ℜ	**	*	- دفع لجن - جذب آلاینده‌ها - محافظت از پاتوژن‌ها
مواد آلی تجزیه‌پذیر	BOD	***	ℜ	**	*	- مصرف اکسیژن - مرگ ماهی
مغذی‌ها	نیتروژن و فسفر	***	ℜ	**	*	- افزایش رشد لجن - مسمویت ماهی (آمونیا) - مشکل نوزادان (نیترات) - آلودگی منابع آبی
پاتوژن‌ها	کلیفرم	***	ℜ	**	*	- مشکلات آبزیان
مواد آلی غیرقابل تجزیه	سموم و مواد شوینده	*	ℜ	*	**	- کف (مواد شوینده) - کاهش انتقال اکسیژن (مواد شوینده) - بوی نامطبوع (فنول)
فلزات	مجموعه فلزات سنگین	*	ℜ	*	-	- جلوگیری از تصفیه بیولوژیکی - مشکلات در استفاده از لجن در کشاورزی - آلودگی منابع آبی
جامدات محلول غیرآلی	TDS	**	ℜ	–	*	- افزایش شوری - مسمومیت گیاهان - مشکلات در نفوذ پذیری خاک (سدیم)
(* کم) (** متوسط) (*** زیاد) (~ متغیر) (– بدون اهمیت)						

ترتیب حذف این آلاینده‌ها بطور معمول، مواد آلی تجزیه‌پذیر، جامدات معلق، پاتوژن‌های موجود در فاضلاب، حذف مغذی‌ها (نیتروژن و فسفر) و ریزآلاینده‌های ناشی از روانآب می‌باشند؛ اگرچه، بدلیل کمبود منابع مالی اولویت اصلی کاهش آلودگی ناشی از مواد آلی و جامدات در ابتدا و سپس دیگر آلاینده‌ها می‌باشند [۱].

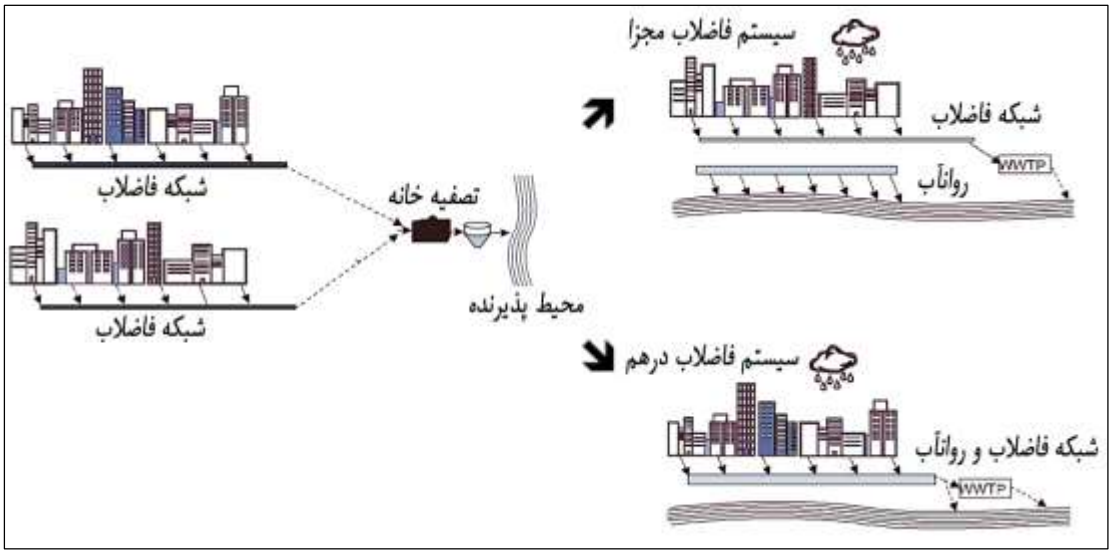
۱- ۱- ۱- شبکه فاضلاب

جمع‌آوری، تصفیه و دفع فاضلاب، مطابق شکل (۱-۱) بصورت در محل و یا مطابق شکل (۲-۱) بصورت خارج از محل (سیستم مجزا و درهم) اجرا می‌شوند [۱].



شکل ۱-۱ تصویر شماتیک از سیستم مدیریت فاضلاب در محل [۱]

ورود جریان‌های فاضلاب شهری به سیستم فاضلاب خارج از محل به سه دسته، (۱) فاضلاب خانگی، (۲) جریان نفوذ و (۳) فاضلاب صنعتی تقسیم می‌شوند [۱].



شکل ۱-۲ تصویر شماتیک از سیستم مدیریت فاضلاب خارج از محل [۱]

جریان نفوذ[1] ناشی از عیب و خرابی در لوله‌ها، اتصالات، مفصل‌ها و یا منهول‌ها در سیستم فاضلاب می‌باشد. مقدار جریان نفوذ به فاکتورهای متفاوتی مانند گستره شبکه جمع‌آوری، قطر خطوط لوله، مساحت زهکشی، نوع خاک، عمق تراز آب، توپوگرافی و تراکم جمعیت بستگی دارد. بطور مثال، ثابت نفوذ معادل با ۰/۰۱ تا ۱ مترمکعب بر کیلومتر در روز به ازای هر میلی‌متر قطر لوله در نظر گرفته می‌شود [۲].

۱- ۱- ۲- ترکیبات فاضلاب

حدود ۹۹/۹٪ از فاضلاب را آب تشکیل می‌دهد. ۰/۱٪ باقی‌مانده آن شامل مواد آلی، غیرآلی، جامدات معلق و جامدات محلول همراه با میکرواورگانیسم‌ها می‌باشد. ترکیبات فاضلاب به اقلیم، نحوه استفاده از آب و شرایط اجتماعی، اقتصادی و فرهنگی بستگی دارند. شاخص‌های موجود در فاضلاب بعنوان معرف کیفیت فاضلاب به سه دسته، (۱) شاخص‌های فیزیکی، (۲) شاخص‌های شیمیایی و (۳) شاخص‌های بیولوژیکی تقسیم می‌شوند. شاخص‌های فیزیکی مانند دما، رنگ، بو و کدورت، شاخص‌های شیمیایی مانند جامدات معلق، جامدات محلول، مواد آلی، نیتروژن، فسفر، قلیاییت، روغن و چربی و شاخص‌های بیولوژیکی مانند باکتری‌ها، قارچ‌ها، پروتوزوا[2]و ویروس‌ها می‌باشند [۱].

۱- ۱- ۳- اثر تخلیه فاضلاب بر روی محیط

سه اثر مهم ناشی از تخلیه فاضلاب بر روی پیکره آبی پذیرنده به ترتیب، (۱) آلودگی ناشی از مواد آلی باعث کاهش اکسیژن محلول، (۲) آلایندگی ناشی از پاتوژن‌ها باعث مرگ میکرواورگانیسم‌ها و (۳) نیتروژن و فسفر باعث ایجاد پدیده یوتریفیکاسیون[3]می‌باشند [۱]. برای هرکدام از این موارد به ترتیب، دلایل، آثار، کنترل و مدل‌سازی آلاینده‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرند. یکی از مشکلات اصلی و شاخص آلودگی آب که در بیشتر مناطق توسعه یافته ارزیابی می‌شود؛ میزان مصرف اکسیژن محلول پس از تخلیه فاضلاب می‌باشد. مطابق جدول (۲-۱)، اثر غیرمستقیم اولیه مواد آلی بر روی پیکره آبی، اکسیژن محلول مصرفی است [۱].

جدول ۱-۲ اثر متقابل در ایجاد تعادل اکسیژن محلول [۱]

مصرف اکسیژن	تولید اکسیژن
اکسید مواد آلی (تنفس)	هوادهی
لجن موجود در کف	فوتوسنتز
اکسید آمونیا (نیتریفیکاسیون)	حرکت جریان، برخورد و تلاطم

[1] Infiltration flow
[2] Protozoa
[3] Eutrophication

۱- ۲- تعاریف، فرمول‌های شیمیایی و رابطه‌ها

مطابق جدول (۳-۱)، تعاریف استفاده شده در این پژوهش به شرح زیر معرفی شده‌اند.

جدول ۱-۳ تعاریف

اختصار	انگلیسی	فارسی
ABR	Anaerobic Baffled Reactor	رآکتور بافل‌دار بی‌هوازی
BOD	Biochemical Oxygen Demand	اکسیژن مورد نیاز بیوشیمیایی
COD	Chemical Oxygen Demand	اکسیژن مورد نیاز شیمیایی
CMAL	Complete Mix Aerated Lagoon	لاگون هوادهی اختلاط کامل
DEWATS	Decentralised Wastewater Treatment System	سیستم تصفیه فاضلاب غیرمتمرکز
DO	Dissolved Oxygen	اکسیژن محلول
EGSB	Expanded Granular Sludge Bed	رآکتور بی‌هوازی پتوی لجن گسترده
FAP	Facultative Aerated Pond	برکه هوادهی اختیاری
FOG	Fat & Oil and Grease	چربی و روغن
HRT	Hydraulic Retention Time	زمان ماند هیدرولیکی
HLR	Hydraulic Load Rate	نرخ بار هیدرولیکی
HSSCW	Horizontal Subsurface Constructed Wetland	تالاب جریان زیر سطحی افقی
INWRDAM	Inter-Islamic Network on Water Resources Development	توسعه منابع آبی کشورهای اسلامی
IDRC	International Development Research Centre	مرکز تحقیق و توسعه بین‌المللی
MP	Maturation Pond	برکه بالغ (هوادهی)
NB	Nitrogen Balanced	نیتروژن متعادل
NL	Nitrogen Limited	نیتروژن محدود
OLR	Organic Loading Rate	نرخ بار آلی
OPs	Organically Phosphorus	فسفر آلی
PVC	Polyvinyl Chloride	پی‌وی‌سی
PPDs	Personal Protective Devices	تجهیزات حفاظتی شخصی

اختصار	انگلیسی	فارسی
RNB	Reactor Nitrogen Balanced	رآکتور با نیتروژن متعادل
RNL	Reactor Nitrogen Limited	رآکتور با نیتروژن محدود
SAB	Submerged Aerated Biofilter	فیلتر زیستی هوادهی غوطه‌ور
SLR	Surface Loading Rate	نرخ بار سطحی
SMA	Specific Methanogenic Activity	فعالیت حداکثری باکتری متان‌ساز
SRT	Sludge Retention Time	زمان ماند لجن (سن لجن)
TC	Total Coliform	کل کلیفرم
TF	Trickling Filter	فیلتر چکنده
TKN	Total Kjeldahl Nitrogen	نیتروژن کل کجلدال
TN	Total Nitrogen	کل نیتروژن
TOC	Total Organic Carbon	کل کربن آلی
TPs	Total Phosphorus	فسفر کل
TSS	Total Suspended Solids	کل جامدات معلق
TSUAR	Two Step Upflow Anaerobic Reactor	رآکتور بی‌هوازی جریان بالا دو مرحله
UABBF	UPflow Anaerobic Biological Baffled Filter	فیلتر بی‌هوازی بافل‌دار جریان بالا
UABF	UPflow Anaerobic Biological Filter	فیلتر بی‌هوازی بیولوژیکی جریان بالا
UAF	Upflow Anaerobic Filter	فیلتر بی‌هوازی جریان بالا
UASBr	Upstream Anaerobic Sludge Blanket Reactor	رآکتور بی‌هوازی پتوی لجن جریان بالا
VHL	Volumetric Hydraulic Load	بار هیدرولیکی حجمی
VOL	Volumetric Organic Load	بار آلی حجمی

مطابق جدول (۴-۱)، فرمول‌های شیمیایی استفاده شده در این پژوهش به شرح زیر معرفی شده‌اند.

جدول ۱-۴ فرمول‌های شیمیایی

فارسی	انگلیسی	فرمول شیمیایی
آمونیاک	Ammonia	NH_3
آمونیوم	Ammonium	NH_4
نیترات	Nitrate	NO_3
آمونیوم کلرید	Ammonium chloride	NH_4Cl
مونوپتاسیم فسفات	Monopotassium phosphate	KH_2PO_4
سدیم هیدروژن‌کربنات	Sodium Bicarbonate	$NaHCO_3$

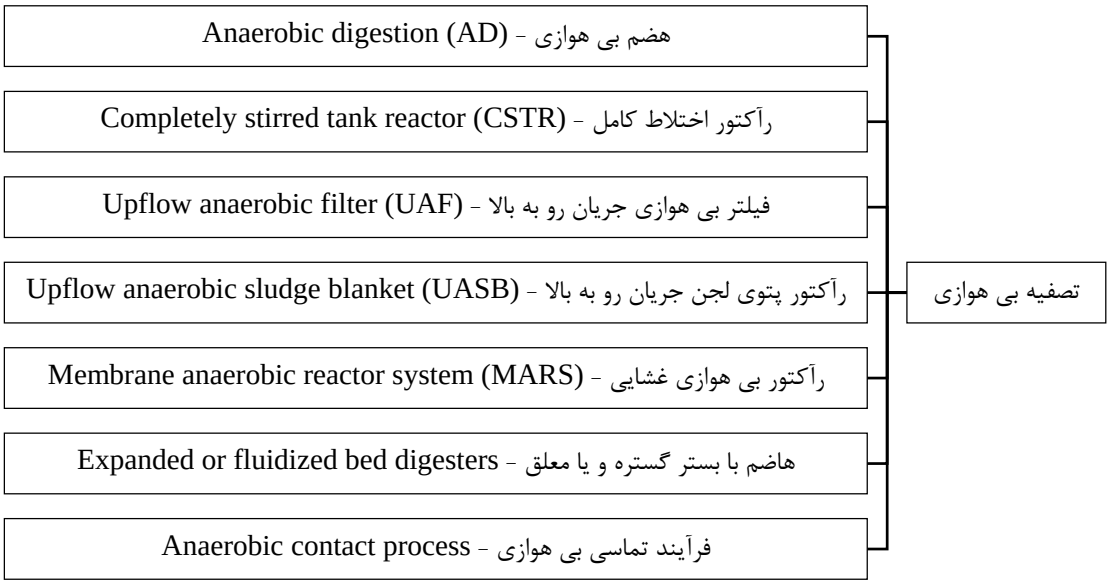
مطابق جدول (۵-۱)، رابطه‌های استفاده شده در این پژوهش به شرح زیر معرفی شده‌اند.

جدول ۱-۵ رابطه‌ها

شاخص	اجزا	رابطه
VOL	S_0: influent BOD concentration (gr/m^3) Q: influent flow (m3/day) V: reactor volume (m^3)	$L_{VO} = \frac{Q \cdot S_0}{V}$ (gr BOD/m3.day)
HLR	Q: influent flow (m3/day) A: surface area (m^2)	$HLR = \frac{Q}{A}$ (m3/m2.day)
VHL	Q: influent flow (m3/day) V: reactor volume (m^3)	$L_V = \frac{Q}{V}$ (m3/m3.day)
HRT	V: reactor volume (m^3) Q: influent flow (m3/day)	$\blacktriangleleft = \frac{V}{Q}$ (day)
SLR	A: surface area (m^2)	$Ls = \frac{Q \cdot S_0}{A}$ (gr BOD/m^2.day)
BOD	DO: Dissolved Oxygen (mgr/lit)	DO (day 0) - DO (day 5)

۱- ۳- معرفی

پیش از این، سهم بزرگی از تصفیه فاضلاب بر عهده واحدهای مرسوم تصفیه هوازی و بی‌هوازی[۱] بوده است [۳]. امروزه، رآکتورها و فیلترهای بیولوژیکی هوازی و بی‌هوازی بصورت گسترده جهت تصفیه فاضلاب همراه با مقدار بالای شاخص (COD)[۲] مورد استفاده قرار می‌گیرند. هضم بی‌هوازی یک فرآیند بیولوژیکی می‌باشد که در آن مواد آلی در نبود اکسیژن توسط میکرواورگانیسم‌های متنوع با سن لجن (SRT)[۳] بالا تجزیه می‌شوند. سیستم تصفیه بی‌هوازی بطور معمول برای تصفیه فاضلاب گرم و بسیار قوی صنعتی همراه با غلظت بالای مواد آلی تجزیه‌پذیر مورد استفاده قرار می‌گیرد. تصفیه بی‌هوازی باعث حذف شاخص‌های (BOD)،[۴] (COD) و (TSS)[۵] از فاضلاب می‌شود. فرآیند بی‌هوازی با مصرف انرژی کم، نیاز به مواد شیمیایی کم و تولید لجن کم در مقایسه با فرآیند هوازی هزینه کمتری نیاز دارد؛ علاوه بر این، زیست‌گاز (بیوگاز)[۶] تولید شده در این فرآیند بعنوان یک منبع انرژی تجدیدپذیر جایگزین سوخت‌های فسیلی برای تولید الکتریسیته می‌باشد. مطابق شکل (۳-۱)، تعدادی از روش‌های تصفیه بی‌هوازی فاضلاب معرفی شده‌اند [۳].



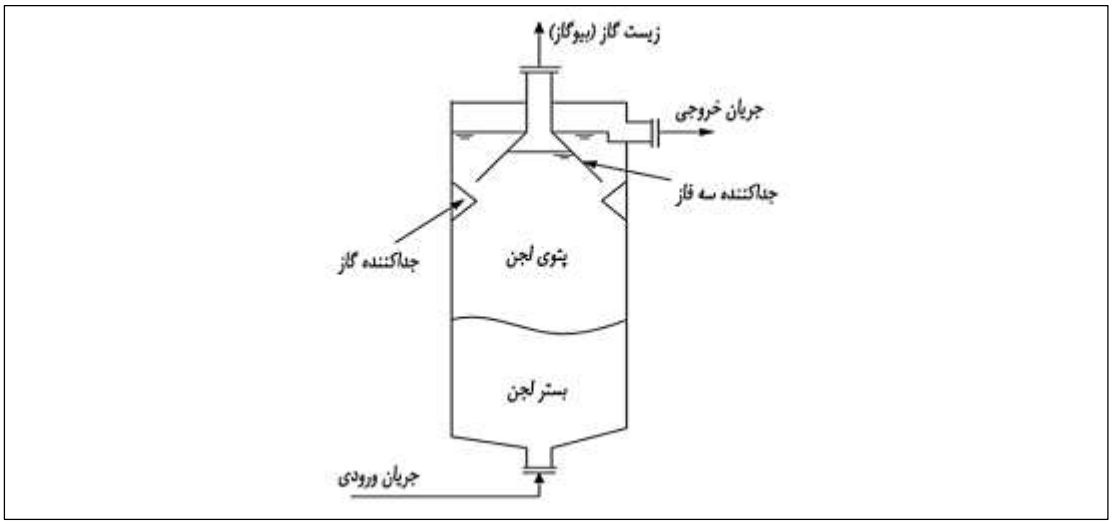
شکل ۱-۳ تعدادی از سیستم‌های تصفیه بی‌هوازی فاضلاب [۳]

[۱] Anaerobic and Aerobic treatment
[۲] Chemical Oxygen Demand
[۳] Sludge Retention Time
[۴] Biochemical Oxygen Demand
[۵] Total Suspended Solids
[۶] Biogas

فصل دوم
رآکتور بی‌هوازی جریان رو به بالا

۲- ۱- مقدمه

لتینگا[۱] و همکاران در اوایل سال ۱۹۷۰، اولین رآکتور بی‌هوازی پتوی (بستر) لجن جریان رو به بالا (UASB)[۲] را در کشور هلند طراحی و اجرا کردند [۳]. این رآکتور یک فرآیند با مخزن تک و مجزا می‌باشد. فاضلاب از سمت پایین تانک وارد شده و به سمت بالا حرکت می‌کند. پتوی لجن معلق، عمل فیلتراسیون و تصفیه فاضلاب عبوری را انجام می‌دهد. چالش‌های مهم برای طراحی رآکتور (UASB)، (۱) سیستم توزیع جریان ورودی، (۲) جداکننده سه فاز (جامد، مایع و گاز) و (۳) کنترل جریان خروجی فاضلاب می‌باشند. در این سیستم، زیست‌گاز تولید شده توسط گنبد مجهز به استحصال گاز مستقر در بالای رآکتور جمع‌آوری می‌شود. مطابق شکل (۱-۳)، رشد باکتری معلق در لایه پتوی لجن بالاتر از بستر لجن در کف تانک، فرآیند تجزیه مواد هضم‌پذیر را ممکن می‌سازد. سرعت متوسط جریان رو به بالا بین ۰/۷ تا ۱ متر بر ساعت برای حفظ پتوی لجن بصورت معلق لازم می‌باشد. پتوی لجن تشکیل شده همراه با جریان ورودی در یک تانک، باعث اثرگذاری همزمان شاخص‌های زمان ماند لجن (SRT) و زمان ماند هیدرولیکی (HRT) در هاضم می‌شوند. جامدات با نیاز به هضم زیاد تا ۹۰ روز می‌توانند در رآکتور باقی بمانند. مواد محلول در فاضلاب مانند شکر به سرعت به گاز تبدیل شده و در کمتر از یک روز از سیستم خارج می‌شوند. بطور معمول پیش از این رآکتور ته‌نشینی اولیه نیاز نمی‌باشد؛ اگرچه، واحد پیش‌تصفیه عملکرد سیستم را بهبود می‌بخشد [۳].



شکل ۲-۱ تصویر شماتیک از رآکتور بی‌هوازی پتوی لجن جریان رو به بالا [۳]

[۱] Lettinga, Gatze
[۲] Upstream (Upflow) Anaerobic Sludge Blanket reactor

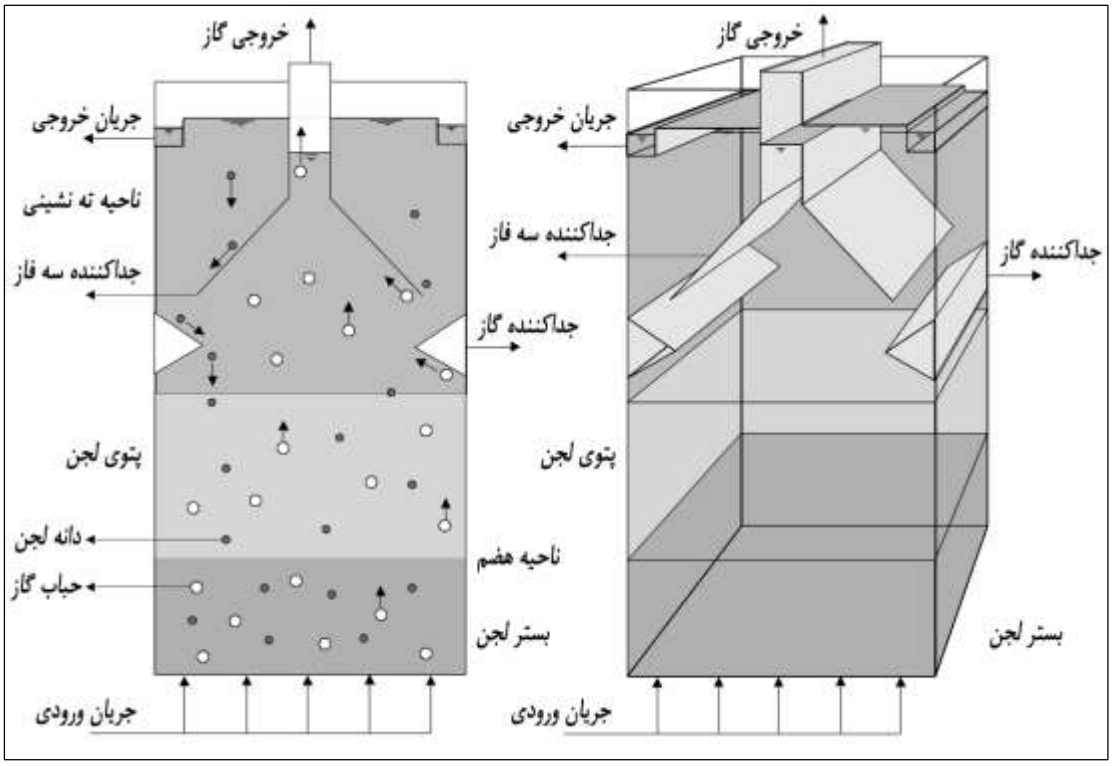
۲- ۲- رآکتور بی‌هوازی پتوی لجن جریان رو به بالا

رآکتور بی‌هوازی پتوی لجن جریان رو به بالا (UASB)، یک فرآیند تک مخزن می‌باشد که اوایل ۱۹۷۰ در کشور هلند توسعه یافت [۸]. فاضلاب خام ورودی از طریق مجرای ورودی در کف رآکتور وارد و به سمت بالا جریان می‌یابد. پتوی لجن معلق، فرآیند فیلتراسیون و تصفیه فاضلاب عبوری از میان آن را انجام می‌دهد. لایه پتوی لجن شامل مجموعه دانه‌ایی میکروبی با ابعاد ۱ تا ۳ میلی‌متر می‌باشد که بدلیل سنگینی در مقابل شسته شدن و خروج مقاومت می‌کنند. میگرواورگانیسم‌های موجود در این لایه لجن، تجزیه ترکیبات آلی را انجام می‌دهند. در انتها، متان و دی‌اکسید کربن از بالای مخزن تخلیه می‌شوند. شکل‌گیری و افزایش حباب‌ها باعث ترکیب بهتر لجن بدون هیچ ابزار مکانیکی و مصرف انرژی می‌شود. از طرفی شیب دیواره، مواد و جامدات را که به روی مخزن رسیده‌اند به سمت پایین توزیع می‌کند. پساب تصفیه شده از بالای بافل شیب‌دار واقع بر روی سطح مخزن به بیرون خارج می‌شود. پس از چند هفته بهره‌برداری از سیستم، دانه‌های لجن بزرگتر شده و به صورت یک فیلتر برای ذرات کوچکتر عمل می‌کنند. به این فیلتر لجن در اصطلاح بالشت لجن[۱] نیز گفته می‌شود. بالشت لجن، نیاز به کنترل و پاکسازی دارد. بدلیل رژیم جریان به سمت بالا، دانه‌های اورگانیسم شکل گرفته بجای شسته شدن و تخلیه، تمایل به انباشت و تجمع پیدا می‌کنند [۸].

در رآکتور بی‌هوازی پتوی لجن جریان رو به بالا (UASB)، سرعت جریان رو به بالا و سرعت ته‌نشینی لجن در حالت تعادل می‌باشند؛ بنابراین، یک پتوی لجن نسبتا پایدار اما معلق شکل می‌گیرد [۹]. برای حفظ پتوی لجن در موقعیت مناسب، بایستی در ابتدا بار هیدرولیکی متناسب با سرعت جریان رو به بالا باشد. همچنین در ادامه سرعت جریان رو به بالا با بار آلی مطابقت داشته باشد. سپس دبی جریان، متناسب با نوسان‌های بار آلی تنظیم می‌شود. بطور معمول برای واحدهای کوچک، نوسان جریان ورودی زیاد است؛ بنابراین، تنظیم دبی فاضلاب امکان‌پذیر نمی‌باشد. علاوه بر این، ایجاد ثبات در فرآیند تصفیه با افزایش زمان ماند هیدرولیکی، بدون کاهش سرعت جریان رو به بالا ممکن نیست. در نتیجه، این سیستم برای تصفیه فاضلاب غیرمتمرکز و متغیر مناسب نمی‌باشد. این مساله با ایجاد واحد متعادل‌ساز پیش از رآکتور قابل حل و اجرا می‌باشد. از طرفی این سیستم برای فاضلاب‌های صنعتی که از آن می‌توان زیست‌گاز استحصال کرد، مورد استفاده قرار می‌گیرد. مطابق شکل (۲-۳)، بافل شیب‌دار[۲] به جداسازی حباب‌های گاز از جامدات و همچنین جامدات از جریان رو به بالای سیال کمک می‌کند. به همین دلیل این بافل‌ها، جداکننده سه فاز[۳] نامیده می‌شوند.

---

[۱] Cushion of sludge
[۲] Gas deflector
[۳] 3 phase separators



شکل ۲-۲ تصویر شماتیک از جداسازی سه فاز در رآکتور بی‌هوازی پتوی لجن جریان رو به بالا [۱]

رآکتور بی‌هوازی پتوی لجن جریان رو به بالا برای بلوغ به چندین ماه زمان نیاز دارد. شکل‌گیری و رشد کافی لجن دانه‌ایی برای فرآیند تصفیه به این زمان بسیار نیاز دارد. بار آلی زیاد در ارتباط با نرخ بار هیدرولیکی کم، شروع فرآیند شکل‌گیری لجن دانه‌ایی را سرعت می‌بخشد. برای شناورسازی و انتقال لجن دانه‌ایی به سطح فاضلاب، نیاز به سرعت جریان رو به بالای بیشتری نسبت به سرعت سقوط ذرات لجن مجزا و کوچک می‌باشد؛ بنابراین، پتوی لجن دانه‌ایی پایدار باقی می‌ماند [۹].

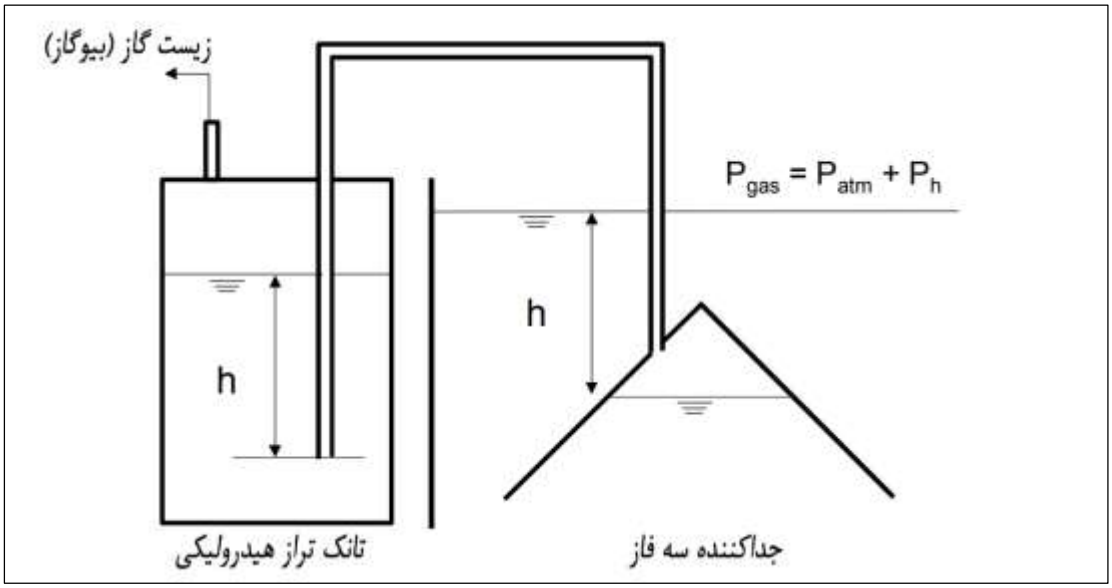
جداکننده سه فاز نیز در رآکتور، مهم‌ترین بخش آن می‌باشد که وظایف زیر را بر عهده دارد [۱۸]:

- جمع‌آوری و استحصال گازهای تولید شده
- افزایش فرآیند ته‌نشینی جامدات معلق در رآکتور و همچنین بازگشت مجدد زیست‌توده به تانک
- کاهش غلظت جامدات در پساب تصفیه شده
- ایجاد فضای مضاعف در بالای جداکننده برای افزایش بار هیدرولیکی

در صورت عملکرد ناقص جداکننده سه فاز، گاز تولید شده در پتوی لجن به ناحیه ته‌نشینی منتقل شده و باعث ایجاد اغتشاش و در نتیجه کاهش راندمان تصفیه و شسته شدن لجن می‌شود [۱۸].

۲- ۲- ۱- رآکتور بی‌هوازی پتوی لجن جریان رو به بالا همراه با جداکننده سه فاز غوطه‌ور

در حالت ایده‌آل، جداکننده سه فاز برای نگهداری گاز در بالای رآکتور بی‌هوازی پتوی لجن جریان رو به بالا (UASB) و جداکننده گاز در زیر آن قرار می‌گیرند [۱۸]. در صورت اجرای جداکننده سه فاز بصورت غوطه‌ور مطابق شکل (۳-۳)، یک تانک ترازکننده هیدرولیکی پیش از رآکتور جهت ایجاد فشار کافی و در نتیجه ممانعت از پر شدن کامل جداکننده سه فاز غوطه‌ور از فاضلاب نیاز می‌باشد.



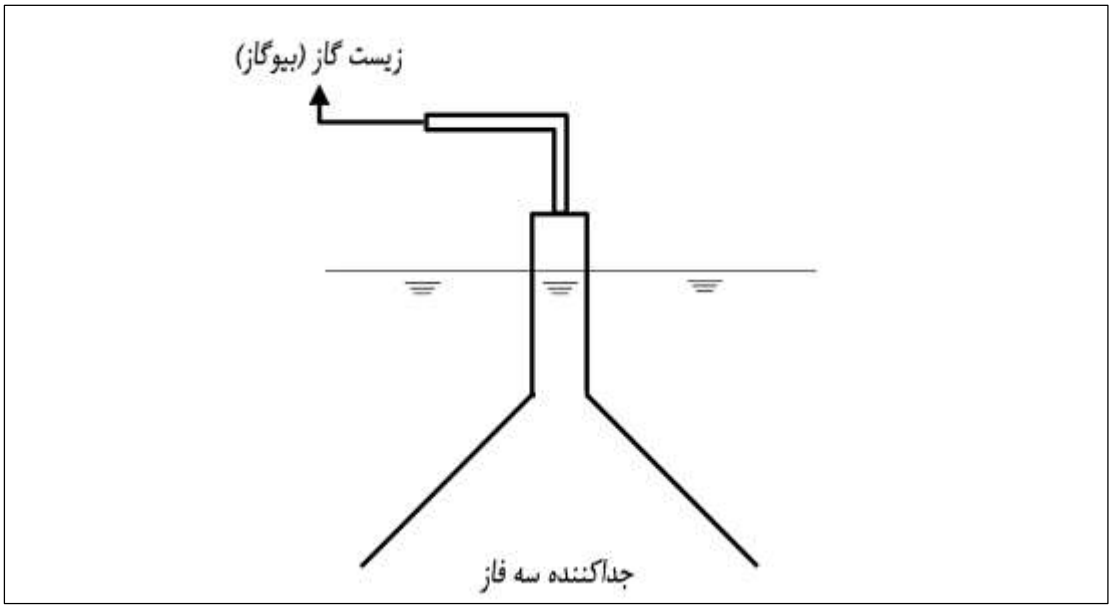
شکل ۲-۳ تصویر شماتیک از جداکننده سه فاز غوطه‌ور و تانک تراز هیدرولیکی [۱۸]

جداکننده سه فاز غوطه‌ور مزایای زیر را دارا می‌باشد [۱۸]:

- بدلیل ساخت جداکننده از فولاد، امکان خردگی و سایش آن کاهش می‌یابد.
- حجم کامل رآکتور برای ته‌نشینی جامدات در دسترس می‌باشد.
- فشار مضاعف، امکان استفاده و دسترسی به گاز خارج شده را آسان می‌کند.
- در صورت اشتعال گاز، تانک تراز هیدرولیکی از رآکتور در برابر خطر انفجار حفاظت می‌کند.

۲- ۲- ۲- رآکتور بی‌هوازی پتوی لجن جریان رو به بالا همراه با جداکننده سه فاز شناور

در طراحی دیگر مطابق شکل (۴-۳)، جداکننده سه فاز بصورت شناور ساخته می‌شود. در این حالت، نوک سازه و محل جمع‌شدن گاز بالاتر از سطح فاضلاب قرار می‌گیرد. مزیت این سیستم، دسترسی آسان به رآکتور برای بررسی، نگهداری و یا تعمیر می‌باشد [۱۸].



شکل ۲-۴ تصویر شماتیک از جداکننده سه فاز شناور [۱۸]

۲- ۳- فرآیند تصفیه در رآکتور بی‌هوازی پتوی لجن جریان رو به بالا

رشد زیست‌توده در رآکتور بی‌هوازی پتوی لجن جریان رو به بالا (UASB)، بصورت معلق درون سیال می‌باشد. در این سیستم هیچگونه رشد چسبیده به مدیا فیلتر وجود ندارد [۱]. چسبندگی میان میکرواورگانیسم‌های مختلف باعث شکل‌گیری دانه‌های کوچک (گرانول) و در نتیجه رشد زیست‌توده می‌شود. دانه‌های کوچک، شرایط مدیا فیلتر را برای جذب و نگهداری دیگر اورگانیسم‌ها آماده می‌کنند. شکل‌گیری دانه‌ها بر روی عملکرد سیستم و راندمان حذف در تصفیه فاضلاب اثر مستقیم دارد. غلظت زیست‌توده در رآکتور بسیار بالا بوده به همین دلیل پتوی لجن[۱] نامیده می‌شود. غلظت بالا در رآکتور، باعث کاهش چشم‌گیر حجم مورد نیاز برای رآکتور در مقایسه با دیگر سیستم‌های تصفیه می‌شود. با توجه به فرآیند بی‌هوازی، گازهای متان و دی‌اکسید کربن شکل گرفته توسط جداکننده گاز بصورت حباب همراه با جریان فاضلاب به سمت جداکننده سه فاز در بالای رآکتور حرکت می‌کنند. ته‌نشینی جامدات نیز در بالای سیستم، بر روی جداکننده سه فاز در ناحیه ته‌نشینی انجام می‌شود. پس از تجمع دانه‌های زیست‌توده، بصورت ثقلی از روی جداکننده به درون رآکتور سقوط می‌کنند. این فرآیند برگشت لجن فعال بدون نیاز به پمپ انجام می‌شود و فرآیند تجزیه مواد آلی را نیز سرعت می‌بخشد. با توجه به ماندگاری بالای جامدات در این سیستم، زمان ماند هیدرولیکی را می‌توان در محدوده ۶ تا ۱۰ ساعت کاهش داد. اصل اول تصفیه فاضلاب در این سیستم، امکان گسترش فعالیت زیست‌توده می‌باشد. زیست‌توده به شکل دانه‌ها و یا لخته‌های ۱ تا ۵ میلی‌متری

[۱] Sludge Blanket

تشکیل می‌شود. با توجه به نبود اختلاط مکانیکی در این رآکتور، تجمع لجن و شکل‌گیری دانه‌های بیشتری اتفاق می‌افتد. سنگین‌ترین ذرات در نزدیکی کف رآکتور رشد می‌کنند؛ بطوریکه، غلظت جامدات کل در این ناحیه ۴۰ تا ۱۰۰ گرم در هر لیتر می‌باشد. اصل دوم تصفیه فاضلاب در این سیستم، جداسازی جامدات و گازها از سیال توسط جداکننده واقع در بالای رآکتور می‌باشد. بدلیل جداسازی در بالای رآکتور نیاز به ایجاد ناحیه ته‌نشینی در آن قسمت نیز می‌باشد. این فرآیند، در ابتدا برای فاضلاب سنگین طراحی شده است؛ اگرچه، این رآکتور برای تصفیه فاضلاب سبک مانند فاضلاب خانگی نیز نتایج خوبی کسب کرده است. در شرایطی که فاضلاب تولید شده عمدتا خانگی باشد، سطح پایینی از ترکیبات سمی و سولفور[۱]در فاضلاب وجود دارد. این نوع فاضلاب توسط این سیستم بخوبی تصفیه می‌شود. در صورت طراحی، ساخت و بهره‌برداری مناسب سیستم، مشکلاتی همچون بوی بد و عدم موفقیت در تصفیه فاضلاب بدلیل وجود مواد سمی و یا بازدارنده‌های واکنش[۲]ایجاد نمی‌شوند [۱].

یکی از مزیت‌های اصلی رآکتور بی‌هوازی پتوی لجن جریان رو به بالا (UASB)، غلظت بالای باکتری‌های تثبیت شده بصورت طبیعی با خاصیت بسیار زیاد ته‌نشینی می‌باشد [۱۰]. این ویژگی از یک طرف، به حذف آلاینده‌های آلی از فاضلاب و از طرف دیگر دستیابی به غلظت بالای زیست‌توده بدون مواد کمکی و در نتیجه کاهش هزینه تصفیه کمک می‌کند. بطورکلی، موفقیت عملکرد این رآکتور در فرآیند تصفیه به شکل‌گیری دانه‌ها (گرانول‌ها) بستگی دارد. این گرانول‌ها ناشی از تجمع بدون حرکت و فشرده اورگانیسم‌ها می‌باشند؛ بنابراین، این تجمع باعث ماندگاری بیشتر اورگانیسم‌ها در رآکتور می‌شود. رآکتور بی‌هوازی پتوی لجن جریان رو به بالا، مستقل از اختلاط مکانیکی و همچنین بازچرخانی لجن زیست‌توده می‌باشد. این سیستم برای تصفیه فاضلاب دارویی مبتنی بر سنتز شیمیایی[۳]نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد. رآکتور بی‌هوازی پتوی لجن جریان رو به بالا، یک هاضم متان‌ساز[۴]می‌باشد. این سیستم، مانند دیگر تصفیه‌های بی‌هوازی به یک فرآیند تصفیه پس از رآکتور مورد نظر برای حذف پاتوژن‌ها نیاز دارد [۱۰].

گومیرو و همکاران در سال ۲۰۲۱، عملکرد و اثر بازچرخانی مکانیزه لجن را بر روی راندمان حذف و مراحل تصفیه در رآکتور بی‌هوازی پتوی لجن جریان رو به بالا (UASB) مورد ارزیابی و بررسی قراردادند [۱۹]. بر اساس این مطالعه، فرآیند بازچرخانی مکانیزه لجن (خارج از سیکل طبیعی سیستم) موجب افزایش غلظت در شاخص‌های پساب تصفیه شده خروجی نسبت به فرآیند بدون بازچرخانی مکانیزه لجن می‌شود. بنابراین، باید در نظر داشت که بازچرخانی لجن در فرآیند تصفیه باعث، (۱) افزایش بار آلی در تمام بخش‌های تصفیه، (۲) کاهش کیفیت تصفیه و (۳) افزایش غلظت در شاخص‌های پساب تصفیه شده می‌شود [۱۹].

---

[۱] Sulfur Compounds
[۲] Reaction Inhibitors
[۳] Chemical synthesis-based
[۴] Methanogenic (methane-producing)

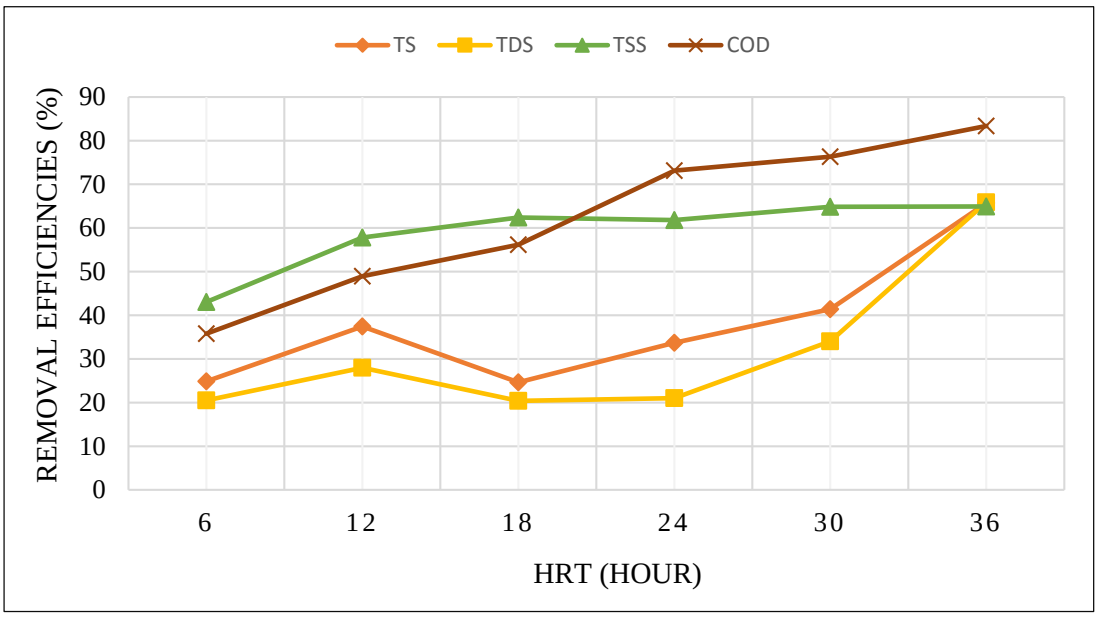
صغیر و حجار[1] در سال ۲۰۲۲، استفاده از رآکتور بی‌هوازی پتوی لجن جریان رو به بالا (UASB) را برای تصفیه بیولوژیکی فاضلاب ناشی از کشتارگاه مورد بررسی قراردادند [۲۰]. تولید در کشتارگاه یک فعالیت آب‌بَر می‌باشد؛ بنابراین، فاضلاب آن حاوی مقدار زیادی از شاخص‌های (BOD)، (FOG)، (COD)، (TSS)، (TN) و (TP) می‌باشد. دلیل استفاده از این رآکتور بعنوان واحد تصفیه بیولوژیکی برای فاضلاب این صنعت، کسب راندمان بالای حذف (COD) بعنوان شاخص اصلی و کاهش چشم‌گیر بار آلی در ادامه فرآیند تصفیه می‌باشد. علاوه بر این، فسفر موجود در فاضلاب این صنعت به فرم‌های (PO_4^{-3})[2] (P_2O_7)[3] و (OP)[4] در شرایط بی‌هوازی به فسفات‌های محلول تبدیل شده که امکان مصرف آن‌ها پس از این مرحله توسط باکتری‌های هوازی میسر می‌شود. رآکتور مورد استفاده در این مطالعه، ۱۳۰ سانتی‌متر ارتفاع با سطح ایستابی ۱۲۰ سانتی‌متر برای فاضلاب، حجم فاضلاب داخل رآکتور ۳۳/۴ لیتر، قطر رآکتور در محدوده بستر لجن ۱۵ سانتی‌متر و در محدوده تصفیه فاضلاب ۳۰ سانتی‌متر اجرا شده است. دمای رآکتور توسط پوشش حرارتی به دور آن بر روی (۳۰±۲) درجه سلسیوس ثابت شده است تا شرایط مناسب برای باکتری مزوفیل بی‌هوازی ایجاد شود. برای کاهش زمان راه‌اندازی این سیستم که بطور معمول ۷۰ روز در نظر گرفته می‌شود؛ لجن دانه‌ایی مناسب از دیگر رآکتور فعال به رآکتور مورد نظر اضافه شده است. در طول زمان راه‌اندازی، زمان ماند هیدرولیکی بر اساس مطالعات پیشین ۲۴ ساعت در نظر گرفته شده است. مطابق جدول (۱-۳)، کنترل سرعت عمودی جریان فاضلاب برای معلق نگه داشتن لایه لجن و تشکیل پتوی لجن ضروری است. بر اساس این مطالعه، کاهش سرعت عمودی جریان باعث افزایش راندمان حذف شده است.

جدول ۲-۱ اثر زمان ماند و سرعت عمودی جریان بر روی راندمان حذف در رآکتور بی‌هوازی [۲۰]

زمان ماند (ساعت)	سرعت عمودی جریان (متر بر ساعت)	راندمان حذف (در صد)			
		TS	TDS	TSS	COD
۶	۰/۳۲	۲۴/۸۸	۲۰/۵۰	۴۳/۰۴	۳۵/۷۸
۱۲	۰/۱۵۶	۳۷/۴۵	۲۷/۹۸	۵۷/۸۳	۴۸/۹۳
۱۸	۰/۱۰۶	۲۴/۶۳	۲۰/۴۱	۶۲/۴۱	۵۶/۱۵
۲۴	۰/۰۸۱	۳۳/۷۰	۲۱/۰۱	۶۱/۸۱	۷۳/۱۲
۳۰	۰/۰۶۴	۴۱/۳۸	۳۴/۰۲	۶۴/۸۶	۷۶/۳۳
۳۶	۰/۰۵۳	۶۵/۶۸	۶۵/۸۶	۶۴/۹۴	۸۳/۳۷

[1] Saghir, A & Hajjar, S
[2] Orthophosphate
[3] Polyphosphate
[4] Organically Phosphorus

در انتهای این پژوهش، زمان راه‌اندازی به ۲۳ روز کاهش یافته است. راندمان حذف برای شاخص‌های (COD) و (BOD) به ترتیب، ۹۶/۳٪ و ۹۶/۶٪ محاسبه شده است؛ بنابراین، زمان راه‌اندازی ۲۳ روز بعنوان آخرین روز از این مرحله تعیین شده است. پس از زمان راه‌اندازی رآکتور (UASB)، این رآکتور با جریان ممتد به فعالیت ادامه داده است. در این مطالعه، اثر تغییر زمان ماند بر روی راندمان حذف آلاینده‌ها نیز مورد بررسی قرارگرفته است. غلظت (MLSS) ماندگار در بستر لجن رآکتور، حدود ۱۷،۱۲۰ تا ۱۹،۹۱۸ میلی‌گرم در لیتر تعیین شده است؛ درحالیکه، میزان لجن تخلیه شده از رآکتور بسیار ناچیز در حدود ۰/۹ تا ۱/۶ لیتر در روز ارزیابی شده است. این کاهش در صورتی اتفاق افتاده است که متوسط راندمان حذف برای شاخص (TSS) کمتر از ۴۵٪ تا ۵۰٪ بوده است. مطابق شکل (۵-۳)، تاثیر زمان ماند بر روی راندمان حذف شاخص‌ها در رآکتور (UASB) تعیین شده است [۲۰].



شکل ۲-۵ راندمان حذف در رآکتور بی‌هوازی پتوی لجن جریان رو به بالا بر اساس زمان ماند [۲۰]

۲- ۳- ۱- شاخص‌های تصفیه در رآکتور بی‌هوازی پتوی لجن جریان رو به بالا

برای بهره‌برداری از رآکتور (UASB)، حداقل دمای فاضلاب (حدود ۱۵ درجه سلسیوس) و همچنین یک محیط بی‌هوازی جهت اطمینان از رشد و افزایش باکتری‌های متان‌ساز[۱] نیاز می‌باشند [۱۸]. تعدادی از شاخص‌های تاثیرگذار بر فرآیند تصفیه که بایستی بطور دائم کنترل شوند در ادامه معرفی شده‌اند [۱۸]:

[۱] Methanogenic Bacteria

- شاخص (pH)

اثر مقدار (pH) بر روی هضم مواد تجزیه‌پذیر بدلیل فعالیت بسیار حساس باکتری‌های متان‌ساز واضح می‌باشد. محدوده پیشنهادی برای (pH)، بین ۶/۳ تا ۷/۸ است. استفاده از بی‌کربنات (کربنات هیدروژن) بعنوان بافر برای دستیابی آسان به این محدوده کمک می‌کند.

- شاخص (COD)

اصولا تصفیه فاضلاب بی‌هوازی برای جریان ورودی با غلظت‌های پایین و بالای شاخص (COD) استفاده می‌شود. بسته به شرایط هر منطقه، مزایای تصفیه بی‌هوازی برای غلظت بالاتر از ۲۵۰ میلی‌گرم در لیتر قابل توجه و برای غلظت بالاتر از ۴۰۰ میلی‌گرم در لیتر (COD) به راندمان عملکرد بهینه دست می‌یابد.

- شاخص دما

فرآیند بهینه تجزیه بی‌هوازی در دمای بین ۳۵ تا ۳۸ درجه سلسیوس حاصل می‌شود. برای دمای پایین‌تر از این محدوده، نرخ تجزیه تا حدود ۱۱٪ به ازای هر درجه کاهش دما، کاهش می‌یابد. بطورکلی، تصفیه بی‌هوازی در دمای بالاتر از ۲۰ درجه سلسیوس بهترین عملکرد را دارا می‌باشد. همچنین با وجود فعالیت حداقلی باکتری‌ها در دمای ۱۰ درجه سلسیوس برای تجزیه میکروبی پایدار، موفق و همینطور اجتناب از اسیدی شدن فرآیند، حفظ دمای فاضلاب بالاتر از ۱۵ درجه سلسیوس ضروری می‌باشد.

- بار (COD) در حجم

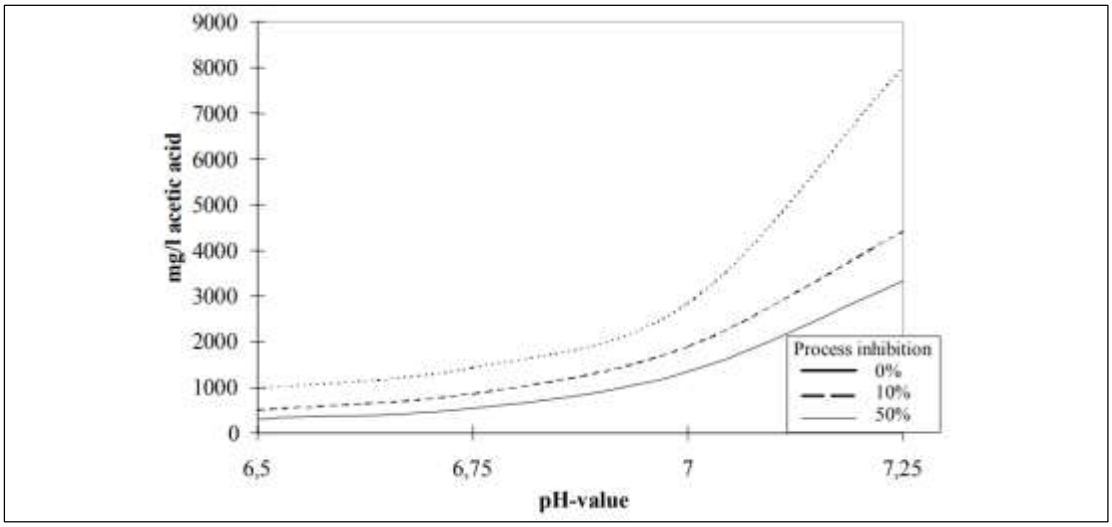
بین بار (COD) در حجم روزانه و درصد کاهش شاخص (COD) رابطه برقرار می‌باشد. در صورت نیاز به حداقل ۶۵٪ کاهش (COD)، نرخ بار آلی در حدود ۲ تا ۳ کیلوگرم (COD) بر مترمکعب در روز حد بحرانی و نهایی می‌باشد.

- اسیدهای آلی

در طول تجزیه بی‌هوازی در رآکتور (UASB)، مواد هضم‌پذیر به زنجیره کوتاه اسیدهای کربن مانند بوتریک اسید[۱] پروپیونیک اسید[۲]و اسید استیک[۳] پیش از شکل‌گیری متان تبدیل می‌شوند. مطابق شکل (۶-۳)، اثر تکانه اسیدهای آلی (در این شکل، اسید استیک) به مقدار (pH) بستگی دارد. برای مقدار پایین (pH) و در نتیجه آن غلظت پایین اسید استیک، فرآیند تجزیه با اختلال روبرو می‌شود.

---

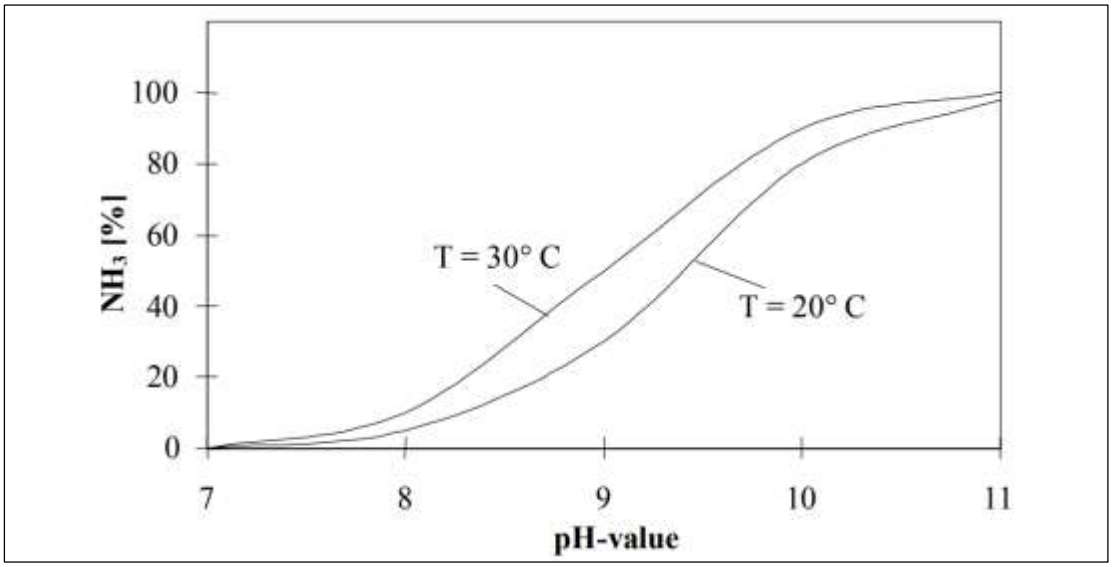
[۱] Butyric acid (C_3H_7-COOH)
[۲] Propionic acid (C_2H_5-COOH)
[۳] Acetic acid (CH_3-COOH)



شکل ۲-۶ وابستگی متقابل غلظت اسید استیک و محیط اسیدی [۱۸]

- غلظت آمونیا

در صورت تشکیل آمونیا (NH_3) در طول فرآیند تخمیر، امکان ایجاد اختلال در فرآیند را ممکن می‌سازد. بطورکلی، غلظت آمونیا و آمونیوم (NH_4) در تعادل می‌باشند؛ اگرچه مطابق شکل (۷-۳)، تفکیک این دو شاخص و نسبت آن‌ها به دمای فاضلاب بستگی دارد. آمونیا در (pH) بالاتر از ۷/۵ شکل می‌گیرد. با رعایت محدوده (pH) از تشکیل آمونیا بعنوان بازدارنده فرآیند کامل تخمیر می‌توان جلوگیری کرد.



شکل ۲-۷ نسبت تشکیل آمونیا به آمونیوم بر اساس دما و محیط اسیدی [۱۸]

- زمان ماند هیدرولیکی

زمان ماند یک عامل مهم و اثرگذار بر روی کاهش شاخص (COD) و همچنین نرخ تجزیه مورد نظر می‌باشد. بطورکلی، این مدت زمان نباید کمتر از ۲ ساعت در نظر گرفته شود.

- سرعت جریان رو به بالا

سرعت جریان رو به بالا، نباید از حد مجاز بیشتر شود؛ بنابراین، از شسته شدن دانه‌های زیست‌توده به خارج از رآکتور جلوگیری می‌شود. حداقل سرعت جریان باعث ایجاد جریان کامل در جهت افزایش تماس میان زیست‌توده و فاضلاب می‌شود. سرعت جریان رو به بالا باید در محدوده ۰/۲ تا ۱ متر بر ساعت باشد.

- دبی فاضلاب

مقدار جریان ورودی فاضلاب به رآکتور باید ثابت باشد. برای دبی با تغییرات زیاد (بارش شدید)، یک تانک متعادل‌ساز با سایز متناسب پیش از رآکتور نصب می‌شود؛ بنابراین، ضمانت تغذیه رآکتور بصورت دائم و ثابت صورت می‌گیرد. اندازه‌گیری دبی نیز بعنوان بخشی از کنترل فرآیند در این سیستم می‌باشد.

مطابق جدول (۲-۳)، شاخص‌های مهم دیگری بصورت سختگیرانه برای بهره‌برداری از رآکتور (UASB) معرفی شده‌اند [۱۸].

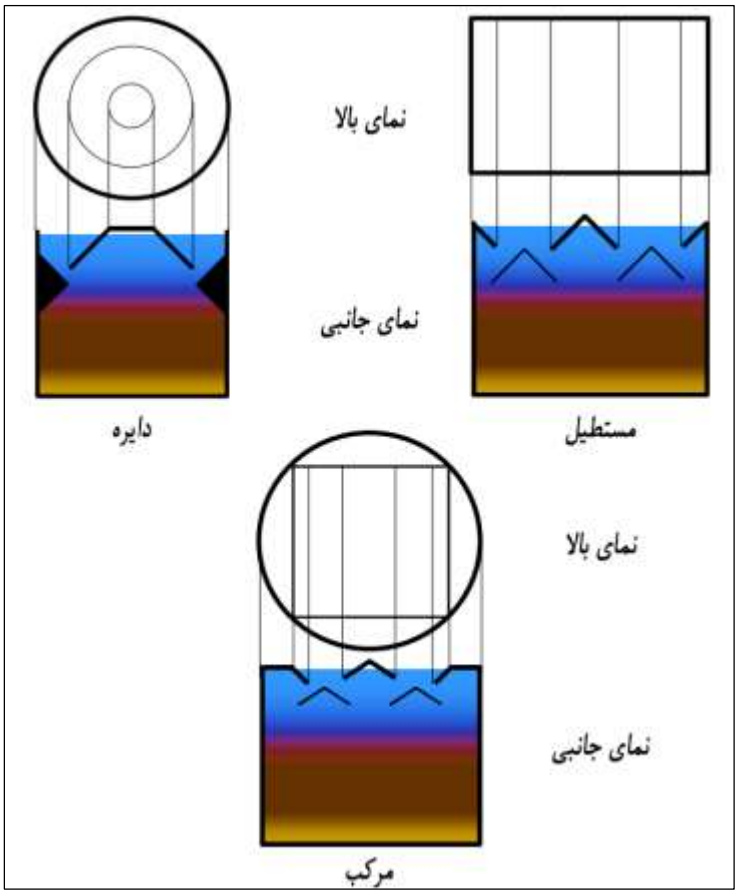
جدول ۲-۲ شاخص‌های مهم بهره‌برداری از رآکتور بی‌هوازی پتوی لجن جریان رو به بالا [۱۸]

شاخص	واحد	مقدار
زمان ماند هیدرولیکی	h	۴ – ۲۰
سرعت جریان رو به بالا	m/h	۰/۲ – ۱
بار (COD) بر حجم	kg COD/m3*day	۰/۴ – ۳/۶
بار لجن	gr COD/gr DOM*day	۰/۰۵ – ۰/۵
انرژی مورد نیاز	kWh/m3 wastewater	۰/۰۷ – ۰/۲
تولید گاز	Nm^3/m3reactor*day	۰/۰۲ – ۰/۳
لجن مازاد	kg DM/p.e.*day	۲/۵ – ۵

DOM: Dry Organic Matter
Nm3: Normal Meter cube
DM: Dry Matter
p.e.: population equivalent

۲- ۴- اصول طراحی در رآکتور بی‌هوازی پتوی لجن جریان رو به بالا

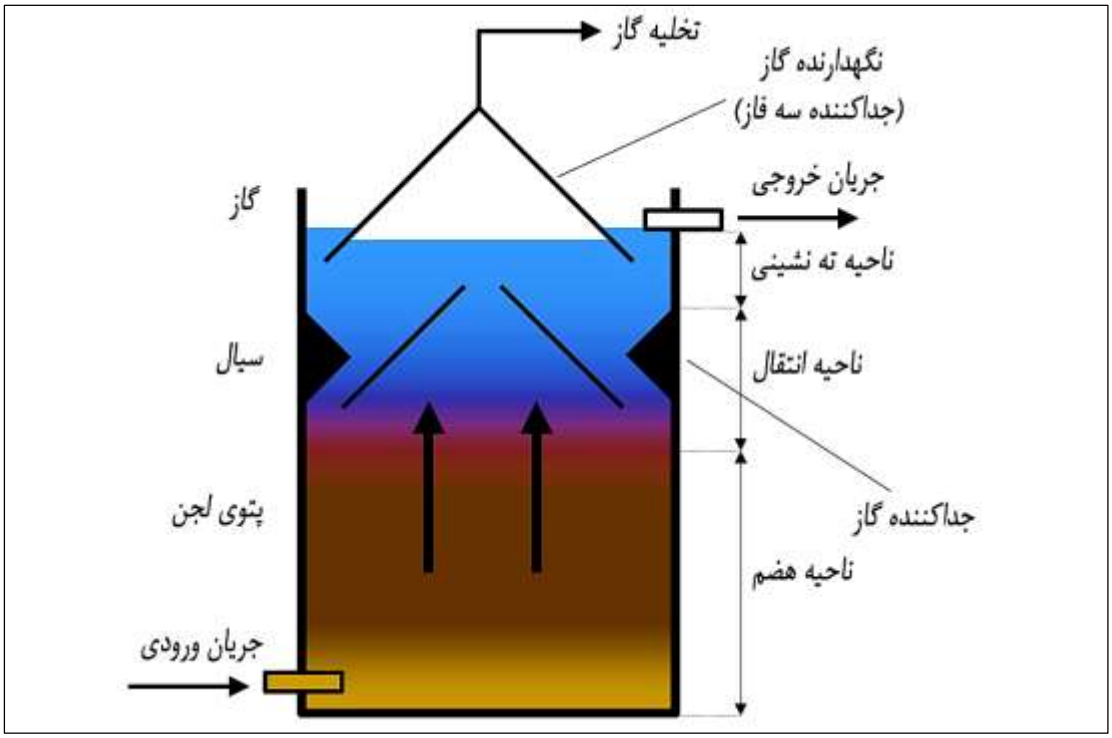
رآکتور بی‌هوازی پتوی لجن جریان رو به بالا (UASB)، یکی از روش‌های معمول برای تصفیه فاضلاب در مناطق گرمسیر می‌باشد [۱]. این سیستم بعنوان فرآیند تصفیه تک واحد و یا همراه با دیگر واحدهای تصفیه پس از رآکتور بهره‌برداری می‌شود. مطابق شکل (۸-۳)، طراحی این سازه با مقطع‌های مختلفی همچون دایره، مربع، مستطیل و مرکب امکان‌پذیر است. برای طراحی این رآکتور بخش‌های مختلفی مانند دمنده هوا[۱] تمیزکننده[۲] پمپ، مبدل حرارتی[۳] بویلر، شیر برقی[۴] شعله‌گیر، مشعل زیست‌گاز، کمپرسور زیست‌گاز و مخزن (CNG) باید در نظر گرفته شوند [۱، ۱۸].



شکل ۲-۸ رآکتور بی‌هوازی پتوی لجن جریان رو به بالا با مقطع‌های مختلف [۱۸]

[۱] Blower
[۲] Scrubber
[۳] Heat exchanger
[۴] Solenoid Valve

قاعده‌های اصلی برای طراحی و اجرای رآکتور بی‌هوازی پتوی لجن جریان رو به بالا به ترتیب، (۱) سیستم توزیع فاضلاب ورودی، (۲) جداکننده فاز گاز و جامد از سیال و (۳) طراحی پساب خروجی می‌باشند [۸]. مطابق شکل (۹-۳)، جریان گاز بالا رفته و توسط گنبد نگهدارنده گاز جمع‌آوری و بعنوان انرژی استفاده می‌شود. سرعت جریان رو به بالا باید از ۰/۷ تا ۱ متر بر ساعت حفظ شود؛ بنابراین، پتوی لجن در سیال بصورت معلق باقی می‌ماند. بطور معمول به ته‌نشینی اولیه پیش از این رآکتور نیاز نمی‌باشد؛ اگرچه، واحد پیش‌تصفیه عملکرد سیستم را بهبود می‌بخشد [۸].



شکل ۲-۹ تصویر شماتیک از موقعیت سه فاز در رآکتور بی‌هوازی پتوی لجن جریان رو به بالا [۱۸]

زمان راه‌اندازی اولیه سیستم، کند و طولانی (در حدود ۴ تا ۶ ماه) می‌باشد [۱]. کاهش این زمان وابسته به مقدار و کیفیت لجن فعال برای تغذیه اولیه سیستم می‌باشد. بر اساس مطالعات انجام شده، در صورت تغذیه سیستم با لجن به اندازه ۴٪ حجم رآکتور، زمان راه‌اندازی به ۲ تا ۳ هفته کاهش می‌یابد. در طول فرآیند تصفیه، جداکننده سه فاز ضامن برگشت لجن به تانک و تولید زیاد زیست‌توده فعال با ماندگاری بالا بدون نیاز سیستم به فیلتر و یا پمپ می‌باشد. کیفیت بالای لجن ماندگار در رآکتور تاثیر قابل توجهی بر روی کیفیت پساب تصفیه شده، دفع مناسب لجن و کاهش زمان راه‌اندازی مجدد پس از یک وقفه کوتاه دارد [۱].

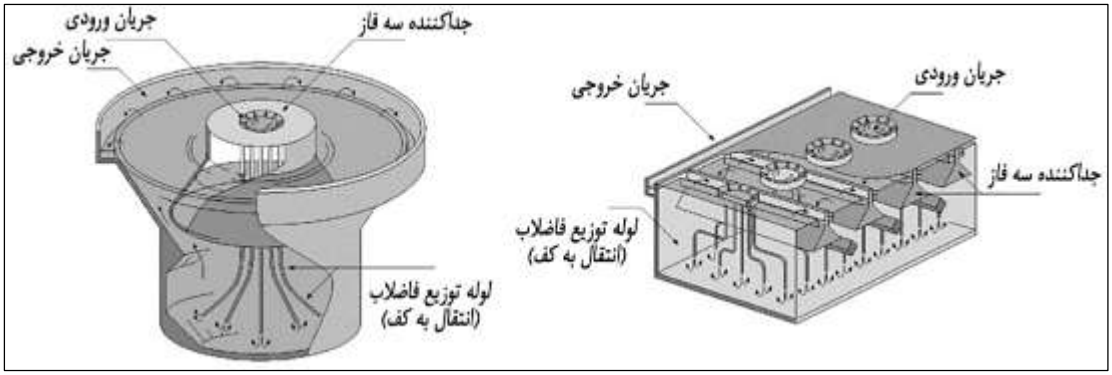
۲- ۴- ۱- ضوابط طراحی در رآکتور بی‌هوازی پتوی لجن جریان رو به بالا

طراحی اولیه رآکتور بی‌هوازی پتوی لجن جریان رو به بالا (UASB)، برای تصفیه فاضلاب صنعتی به شکل رآکتور استوانه‌ایی و یا مکعب مستطیلی اجرا شده است [۱]. در این رآکتور، هضم و ته‌نشینی در یک ناحیه انجام می‌شود. برای بهره‌برداری از این سازه در تصفیه فاضلاب با غلظت کم مانند فاضلاب خانگی مواردی را بایستی در نظر گرفت. طراحی این رآکتور برای تصفیه فاضلاب با غلظت کم، بر اساس شاخص بار هیدرولیکی و نه شاخص بار آلی می‌باشد. سرعت جریان رو به بالا در ناحیه هضم و ته‌نشینی بسیار اهمیت دارد. سرعت زیاد جریان عمودی، موجب خارج شدن زیست‌توده از سیستم و در نتیجه کاهش پایداری فرآیند تصفیه می‌شود. برای حفظ سرعت پیشنهادی جریان رو به بالا در محدوده مناسب مطابق جدول (۳-۳)، ارتفاع رآکتور کاهش و سطح مقطع آن افزایش داده می‌شود.

جدول ۲-۳ سرعت پیشنهادی جریان رو به بالا برای طراحی رآکتور بی‌هوازی [۱]

دبی جریان	سرعت جریان رو به بالا (متر بر ساعت)
دبی متوسط جریان	۰/۵ تا ۰/۷
دبی حداکثر جریان	< ۰/۹ تا ۱/۱
دبی حداکثر موقت جریان*	< ۱/۵
* دبی حداکثر موقت جریان معادل با ۲ تا ۴ ساعت در روز	

در این رآکتور، جریان فاضلاب معمولا از سمت پایین به رآکتور وارد و سپس توزیع می‌شود؛ درحالیکه، جریان فاضلاب می‌تواند از بالای رآکتور نیز وارد شده و سپس در پایین تانک توزیع شود. مساحت ناحیه ته‌نشینی در صورت ورود از بالا، توسط اجزا توزیع‌کننده فاضلاب کاهش و سرعت جریان افزایش می‌یابد. برای کاهش سرعت جریان رو به بالا در ناحیه ته‌نشینی، سطح مقطع در آن ناحیه را مطابق شکل (۱۰-۳) می‌توان افزایش داد؛ بطوریکه، در ناحیه هضم سطح مقطع کوچک و در ناحیه ته‌نشینی بزرگ می‌باشد.



شکل ۲-۱۰ تصویر سه بعدی از رآکتور با جریان ورودی فاضلاب از بالا و شبکه توزیع آن در کف مخزن [۱]

برای ایجاد دبی جریان و بار آلی ثابت، معمولا وجود تانک متعادل‌ساز پیش از رآکتور (UASB) لازم می‌باشد. در صورت عدم استفاده از تانک متعادل‌ساز، رآکتور در مواجه با تغییرات شدید بار و دبی جریان قرار می‌گیرد؛ بنابراین، افزایش سطح مقطع در نزدیکی ناحیه ته‌نشینی می‌تواند یک استراتژی مناسب برای اطمینان از کاهش سرعت جریان رو به بالا در زمان دبی حداکثر باشد. سطح مقطع رآکتور می‌تواند دایره و یا مستطیل باشد. رآکتورهای دایره‌ایی، اقتصادی‌تر و برای تصفیه فاضلاب جمعیت کم بصورت تک واحد استفاده می‌شوند. رآکتورهای مستطیلی برای تصفیه فاضلاب جمعیت زیاد و همچنین هنگامی که ابعاد و اندازه سازه اهمیت داشته باشند، استفاده می‌شوند. بار هیدرولیکی حجمی (VHL)[1]در این رآکتور نباید از ۵ مترمکعب بر مترمکعب در روز بیشتر شود. این مقدار معادل با حداقل زمان ماند هیدرولیکی برابر با ۴/۸ ساعت می‌باشد. طراحی رآکتور با بار هیدرولیکی زیاد (زمان ماند هیدرولیکی کم)، باعث خروج بیشتر زیست‌توده از رآکتور و کاهش زمان ماندگاری و پایداری جامدات درون تانک می‌شود. این مساله‌ها می‌تواند خود باعث شکست سیستم تصفیه شود. طبق جدول (۴-۳)، زمان ماند هیدرولیکی برای رآکتور (UASB) با دبی متوسط روزانه بطور معمول بین ۸ تا ۱۰ ساعت برای تصفیه فاضلاب خانگی در دمای ۲۰ درجه سلسیوس تعیین شده است. این زمان برای دبی حداکثر نباید کمتر از ۴ ساعت در نظر گرفته شود.

جدول ۲-۴ زمان ماند هیدرولیکی پیشنهادی برای رآکتور بی‌هوازی پتوی لجن جریان رو به بالا [۱]

دمای فاضلاب (سلسیوس)	زمان ماند هیدرولیکی (ساعت)	
	متوسط روزانه	حداقل
۱۶ تا ۱۹	۱۰ تا ۱۴ <	۷ تا ۹ <
۲۰ تا ۲۶	۶ تا ۹ <	۴ تا ۶ <
۲۶ <	۶ <	۴ <

ارتفاع قابل قبول برای رآکتور (UASB) به مواردی همچون، (۱) نوع لجن حاضر در رآکتور، (۲) بار آلی وارد شده و (۳) بار هیدرولیکی حجمی (سرعت جریان رو به بالا) بستگی دارد. ارتفاع موثر رآکتور برای شکل‌گیری لخته‌های لجن با سرعت مناسب جریان رو به بالا بین ۴ تا ۵ متر تعیین شده است. این ارتفاع برای ناحیه ته‌نشینی بین ۱/۵ تا ۲ متر و ناحیه هضم بین ۲/۵ تا ۳/۵ متر می‌باشد. بر اساس مساله‌های مالی و فنی، بتن و فولاد با لایه محافظ داخلی اپوکسی[2]بیشترین استفاده را در ساخت این رآکتور دارند. برای جداکننده سه فاز در رآکتور، بدلیل مواجه با خردگی زیاد و امکان نشت گاز استفاده از مواد مقاوم‌تر و با حجم کمتر نسبت به فولاد، مانند پلی‌وینیل کلراید (PVC)،[3] فایبرگلاس[4]و فولاد ضد زنگ[5]گزینه‌های بهتری ارزیابی شده‌اند.

[1] Volumetric Hydraulic Load
[2] Epoxy
[3] Polyvinyl Chloride
[4] Fiberglass
[5] Stainless steel

مطابق جدول (۵-۳)، معیارهای مهم دیگری برای طراحی رآکتور بی‌هوازی (UASB) تعیین و معرفی شده‌اند [۱].

جدول ۲-۵ معیارهای طراحی برای رآکتور بی‌هوازی پتوی لجن جریان رو به بالا [۱]

شاخص	واحد	محدوده مقدار		
		دبی متوسط	دبی حداکثر	دبی حداکثر موقت*
بار هیدرولیکی حجمی	m^3/m^3*day	< ۴	< ۶	< ۷
زمان ماند هیدرولیکی	hour**	۶ تا ۹	۴ تا ۶	۳/۵ تا ۴ <
سرعت جریان رو به بالا	m/hour	۰/۵ تا ۰/۷	< ۰/۹ تا ۱/۱	< ۱/۵
سرعت در دهانه ناحیه ته‌نشینی	m/hour	< ۲ تا ۲/۳	< ۴ تا ۴/۲	< ۵/۵ تا ۶
نرخ بار سطحی در ناحیه ته‌نشینی	m^3/m^2*day	۰/۶ تا ۰/۸	< ۱/۲	< ۱/۶
زمان ماند در ناحیه ته‌نشینی	hour	۱/۵ تا ۲	> ۱	> ۰/۶
قطر لوله توزیع ورودی	mm	۷۵ تا ۱۰۰		
قطر دهانه خروجی لوله توزیع	mm	۴۰ تا ۵۰		
فاصله بین دهانه ورودی و کف	m	۰/۱ تا ۰/۱۵		
ناحیه اثر هر لوله توزیع	m^2	۲ تا ۳		
عمق ناحیه ته‌نشینی	m	۱/۵ تا ۲		
شیب بهینه بدنه ته‌نشینی	D^o	۵۰ تا ۶۰		
غلظت لجن	kg/m^3	۱۰۲۰ تا ۱۰۴۰		
قطر لوله تخلیه لجن	mm	۱۰۰ تا ۱۵۰		

* دبی حداکثر موقت جریان معادل با ۲ تا ۴ ساعت در روز

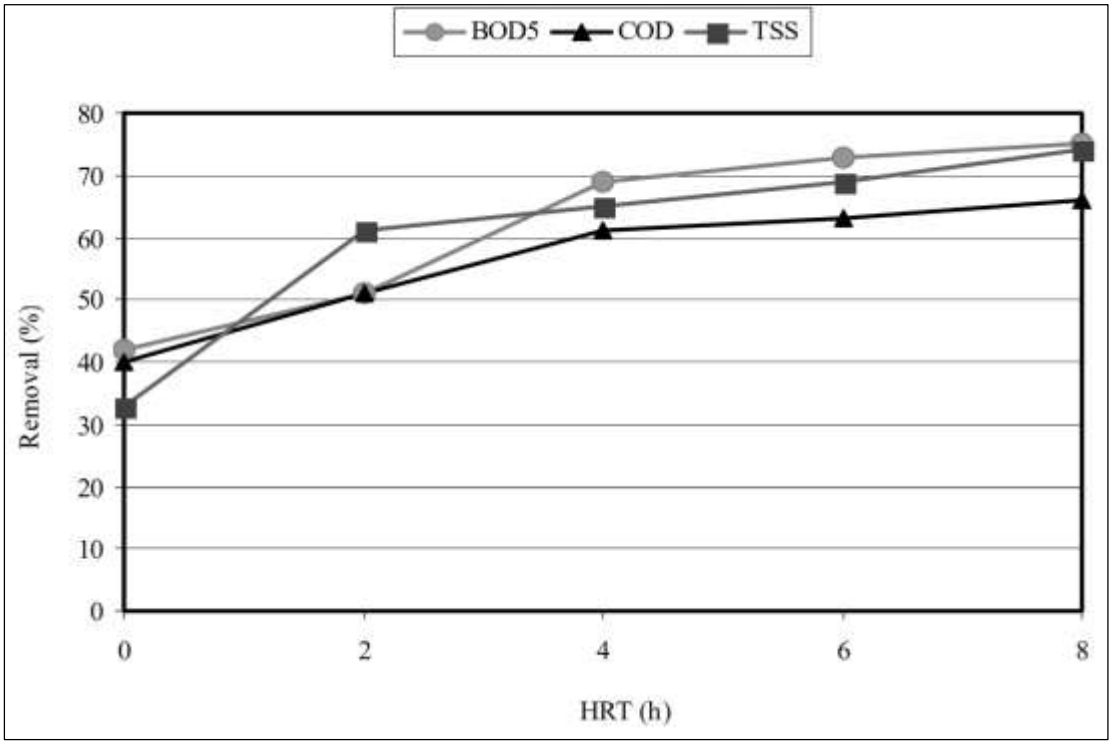
** برای دمای فاضلاب در محدوده ۲۰ تا ۲۶ درجه سلسیوس

عظیمی و زمان‌زاده[۱] در سال ۲۰۰۴، معیارهای لازم برای طراحی یک رآکتور بی‌هوازی پتوی لجن جریان رو به بالا (UASB) را بعنوان سیستم تصفیه فاضلاب در منطقه گرمسیر تعیین کردند [۲۱]. بر اساس این مطالعه، یک نمونه پایلوت برای بررسی اصول شاخص‌های طراحی رآکتور بی‌هوازی پتوی لجن در یک شهر کوچک واقع در منطقه گرم ایران راه‌اندازی شد. برای این منظور، یک استوانه فولادی با قطر ۰/۶ متر و ارتفاع ۳/۶ متر، بعنوان رآکتور با حجم ۱ مترمکعب طراحی شده است. ناحیه هضم و جداکننده سه فاز به ترتیب، ۸۳٪ و ۱۷٪ از حجم رآکتور را تشکیل داده‌اند. فاضلاب ورودی با عبور از لوله‌ایی به قطر ۵۰ میلی‌متر و توزیع جریان بر روی یک شیشه پلکسی[۲] سوراخ‌دار، ۴۰ سانتی‌متر بالاتر از کف وارد تانک می‌شود. در بازه مطالعاتی ۲۰۳ روزه این پژوهش، دو فاز (جامد و گاز) از سیال در دمای محیط جدا شده‌اند. دمای فاضلاب

[۱] Azimi,A & Zamanzadeh,M

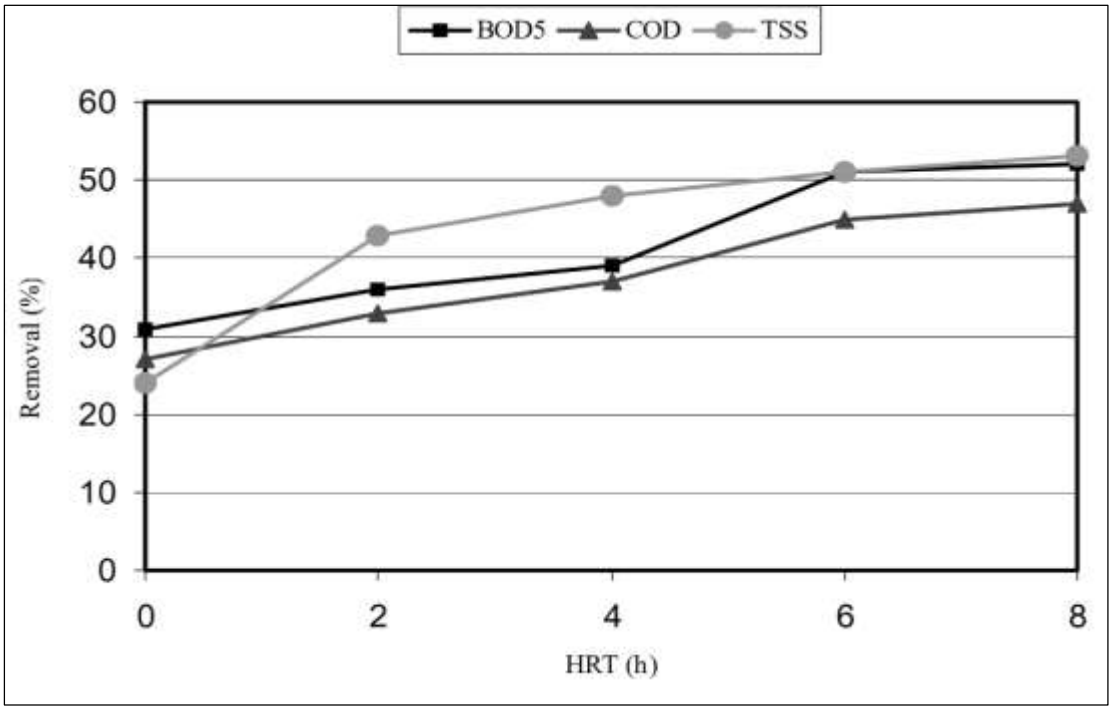
[۲] Plexiglass

ورودی به تانک بطور طبیعی در محدوده ۲۲ تا ۲۶ درجه سلسیوس، بدون مبدل حرارتی حفظ شده است. در این تحقیق، اثر زمان‌های ماند مختلف بر روی راندمان رآکتور (UASB) در دو دوره ۳ ماهه (گرم و سرد) بررسی شدند. زمان‌های ماند هیدرولیکی این پژوهش به ترتیب، ۲، ۴، ۶، ۸ و ۱۰ ساعت با بارهای هیدرولیکی مختلف از ۰/۹۵ تا ۵/۷۰ کیلوگرم (COD) بر مترمکعب در روز برای دوره سرد و از ۱/۳۵ تا ۶/۴۰ کیلوگرم (COD) بر مترمکعب در روز برای دوره گرم مورد بررسی و آزمایش قرارگرفتند. بر اساس نتایج حاصل شده، زمان ماند هیدرولیکی بهینه برای دوره گرم با نرخ بار آلی برابر با ۲/۲۰ کیلوگرم (COD) بر مترمکعب در روز، حدود ۶ ساعت محاسبه شده است. برای زمان ماند بهینه دوره گرم مطابق شکل (۱۱-۳)، راندمان حذف شاخص‌های (BOD)، (COD) و (TSS) به ترتیب، ۷۱٪، ۶۳٪ و ۶۸٪ تعیین شده‌اند.



شکل ۲-۱۱ راندمان حذف در دوره گرم برای رآکتور بی‌هوازی پتوی لجن جریان رو به بالا [۲۱]

زمان ماند هیدرولیکی بهینه برای دوره سرد با نرخ بار آلی برابر با ۱/۲۲ کیلوگرم (COD) بر مترمکعب در روز، حدود ۸ ساعت محاسبه شده است. بر اساس زمان ماند بهینه دوره سرد مطابق شکل (۱۲-۳)، راندمان حذف شاخص‌های (BOD)، (COD) و (TSS) به ترتیب، ۵۴٪، ۴۶٪ و ۵۳٪ تعیین شده‌اند. بر اساس نتایج بدست آمده در این تحقیق، راکتور (UASB) می‌تواند بعنوان یک سیستم تصفیه موثر برای فاضلاب شهری در مناطق گرمسیری استفاده شود [۲۱].



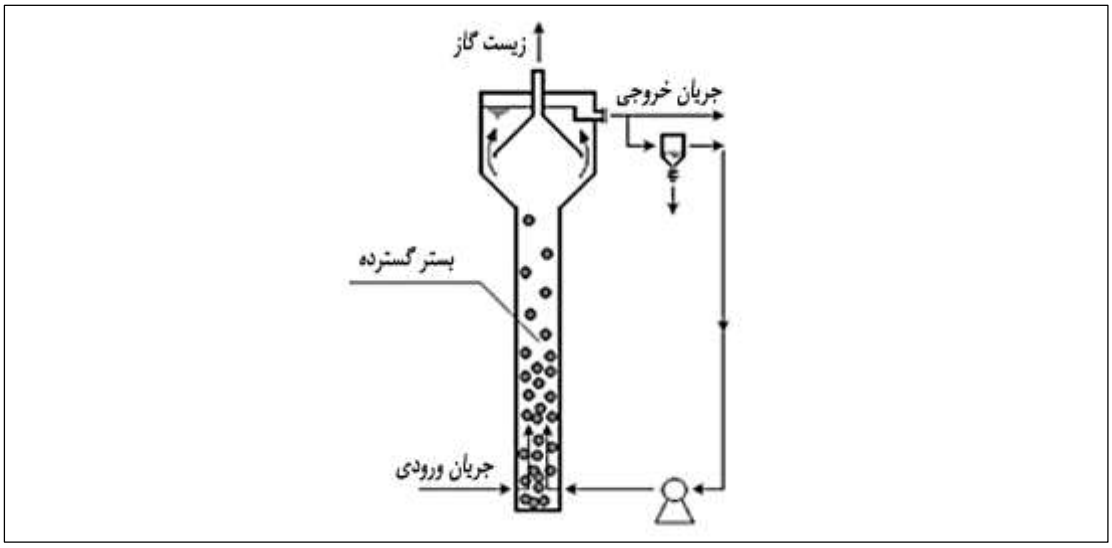
شکل ۲-۱۲ راندمان حذف در دوره سرد برای رآکتور بی‌هوازی پتوی لجن جریان رو به بالا [۲۱]

۲- ۵- انواع دیگر رآکتورهای بی‌هوازی پتوی لجن جریان رو به بالا

۲- ۵- ۱- رآکتور بی‌هوازی پتوی لجن دانه‌ایی گسترده

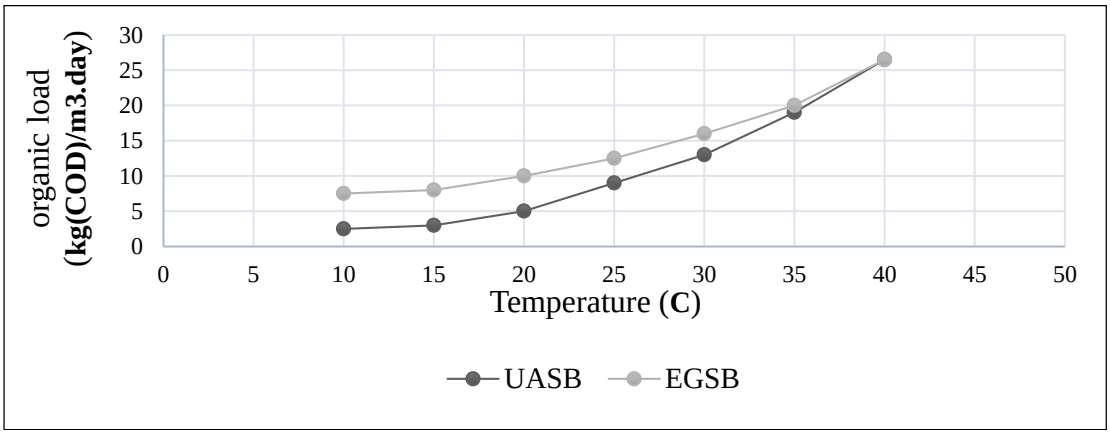
رآکتور بی‌هوازی پتوی لجن جریان رو به بالا (UASB)، بسته به نوع فاضلاب و نیاز به حذف آلاینده‌های مورد نظر در سازه‌های مختلفی طراحی و اجرا می‌شود [۱]. رآکتور بی‌هوازی پتوی لجن دانه‌ایی گسترده (EGSB)[۱] بر اساس نوع لجن و مقدار افزایش پتوی لجن شرایط تجزیه مواد هضم‌پذیر را ایجاد می‌کند. مطابق شکل (۱۳-۳)، نسبت ارتفاع به قطر در این رآکتور بیشتر از بیست می‌باشد؛ بنابراین، تماس بهتری بین زیست‌توده و مواد هضم‌پذیر ایجاد می‌شود. برای تشکیل پتوی لجن و ثابت ماندن آن درون رآکتور، سرعت جریان رو به بالا برای رآکتور (EGSB) در مقایسه با رآکتور (UASB) بیشتر در نظر گرفته می‌شود. سرعت جریان رو به بالا برای رآکتور (EGSB) بین ۵ تا ۱۰ متر بر ساعت می‌باشد؛ درحالیکه، این مقدار برای رآکتور (UASB) بین ۰/۵ تا ۱/۵ متر بر ساعت در نظر گرفته می‌شود. این رآکتور بدلیل سرعت زیاد جریان رو به بالا، عملکرد بهتری برای تصفیه آلاینده‌های محلول در فاضلاب نسبت به حذف دانه‌های مواد آلی دارد. ارتفاع این رآکتور متناسب با راندمان حذف مورد نیاز تا ۲۰ متر طول می‌تواند باشد.

[۱] Expanded Granular Sludge Bed



شکل ۲-۱۳ تصویر شماتیک از رآکتور بی‌هوازی پتوی لجن دانه‌ایی گسترده [۱]

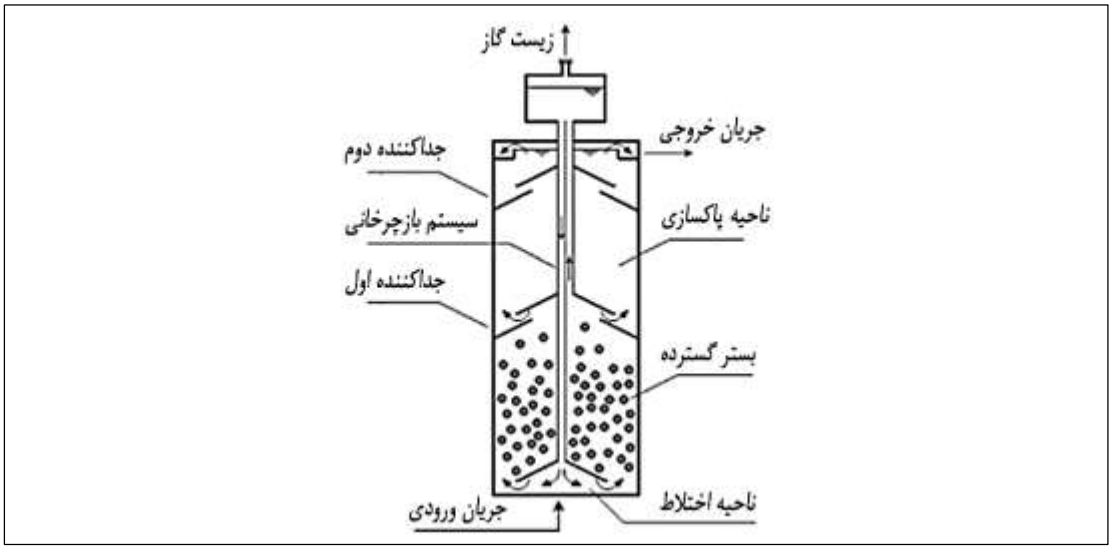
مطابق شکل (۱۴-۳)، بار آلی حجمی شاخص (COD) برای رآکتور (EGSB) و رآکتور (UASB) بر اساس تغییرات دما تعیین شده است. در شرایط ترموفیل، بار آلی حجمی این دو رآکتور برابر شده است؛ درحالیکه، این شاخص در دمای پایین‌تر برای رآکتور بی‌هوازی پتوی لجن دانه‌ایی گسترده نسبت به رآکتور بی‌هوازی پتوی لجن جریان رو به بالا با اختلاف بیشتری تعیین شده است [۱].



شکل ۲-۱۴ مقایسه بار آلی حجمی بر اساس دما برای دو رآکتور بی‌هوازی [۱]

۲- ۵- ۲- رآکتور بی‌هوازی همراه با بازچرخانی داخلی

رآکتور بی‌هوازی همراه با بازچرخانی داخلی، نوع توسعه یافته رآکتور بی‌هوازی پتوی لجن جریان رو به بالا (UASB) می‌باشد؛ بطوریکه، شامل دو رآکتور (UASB) در یک سیستم می‌باشد [۱]. این رآکتور راندمان حذف بالایی در هنگام مواجه با بار آلی حجمی زیاد (۳۰ تا ۴۰ کیلوگرم (COD) بر مترمکعب در روز) را دارا می‌باشد. به دنبال این بار زیاد، جداسازی جامدات و گازهای بیشتری از فاضلاب صورت می‌گیرد. افزایش تولید گاز موجب ایجاد اغتشاش در جریان و ممانعت از ماندگاری زیست‌توده در سیستم می‌شود؛ بنابراین، در این سیستم از دو سطح جداکننده جامدات و سیال مطابق شکل (۱۵-۳) استفاده می‌شود. در سطح جداکننده اول، سهم بالایی از زیست‌گاز در سیستم تولید می‌شود؛ در نتیجه، این جداکننده باعث کاهش اغتشاش در بخش‌های بالایی رآکتور می‌شود. در سطح جداکننده دوم، ماندگاری مقدار زیست‌توده بیشتر درون سیستم و همچنین پاکسازی بیشتر جریان خروجی تضمین می‌شود.



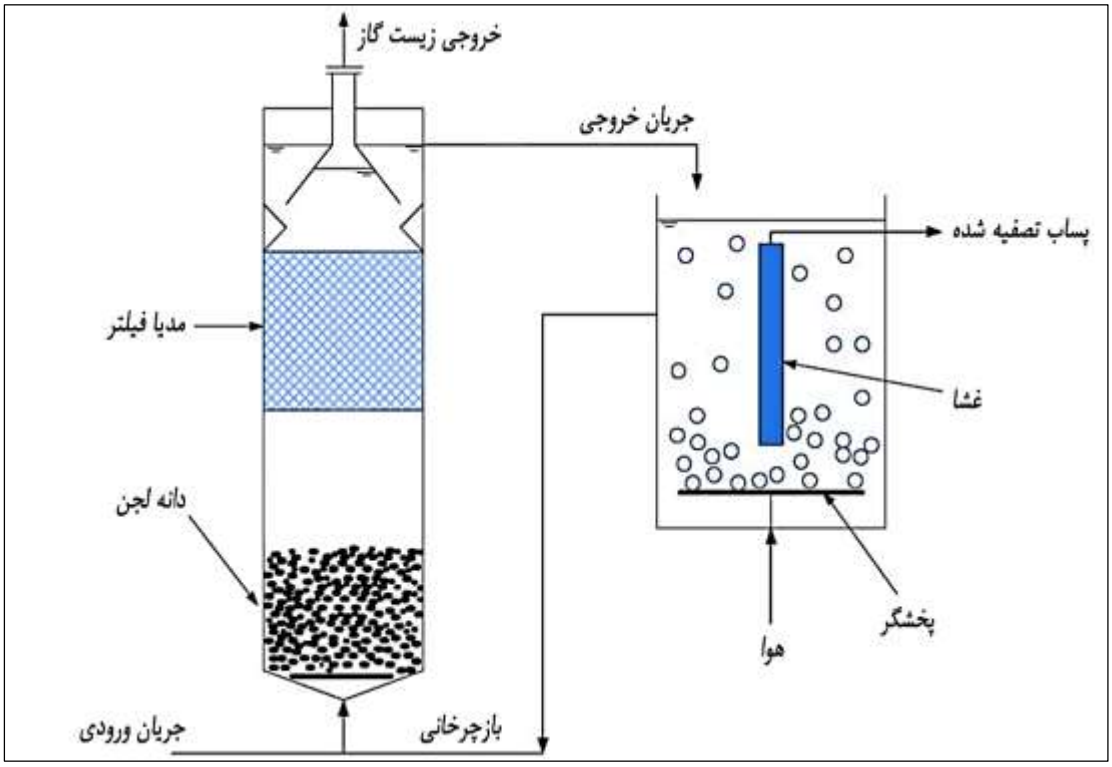
شکل ۲-۱۵ تصویر شماتیک از رآکتور بی‌هوازی همراه با بازچرخانی داخلی [۱]

ارتفاع این رآکتور در بیشترین حالت ۱۶ تا ۲۰ متر می‌باشد. پس از جداسازی زیست‌گاز در بالاترین نقطه رآکتور، سیال همراه با جامدات موجود در آن برای اختلاط بیشتر و افزایش برخورد زیست‌توده و فاضلاب ورودی به ناحیه اول رآکتور در قسمت پایین بازگردانده می‌شود. بطورکلی رآکتور بی‌هوازی همراه با بازچرخانی داخلی از چهار بخش تشکیل شده است. (۱) ناحیه اختلاط، پایین‌ترین بخش رآکتور موجب تماس جریان ورودی، زیست‌توده و جریان بازچرخانی شده می‌شود. (۲) ناحیه بستر گسترده، سطح اول جداکننده شامل بیشترین غلظت لجن دانه‌ایی و تولید زیست‌گاز می‌باشد. بدلیل فعالیت زیاد لجن در این ناحیه امکان ورود بار آلی زیاد در آن می‌باشد. (۳) ناحیه پاکسازی، سطح دوم جداکننده شامل یک فرآیند

پس‌تصفیه و ماندگاری بیشتر زیست‌توده به سه دلیل، (اول) تحت اثر بار کمتر، (دوم) زمان ماند هیدرولیکی بالا و (سوم) رژیم جریان نهرگونه[1] در این ناحیه، می‌باشد. بدلیل حذف بالای شاخص (COD) در ناحیه بستر گسترده (سطح اول جداکننده) و جمع‌آوری زیست‌گاز توسط جداکننده اول، اغتشاش ناشی از تولید گاز و جریان رو به بالا در ناحیه پاکسازی (سطح دوم جداکننده) کم می‌باشد. (۴) سیستم بازچرخانی، شرایط بازگشت جریان فاضلاب با دو فاز جامد و مایع بدون حضور زیست‌گاز جدا شده را بدون پمپ فراهم می‌کند. بر اساس مطالعه انجام شده، یک رآکتور با حجم ۱۷ مترمکعب با تصفیه فاضلاب به غلظت ۳،۵۰۰ میلی‌گرم (COD) در لیتر، تقریبا ۲/۵ برابر جریان گاز حاصل شده به جریان بازچرخانی شده نیاز دارد [۱].

۲- ۵- ۳- رآکتور بی‌هوازی همراه با بازچرخانی خارجی، غشا و مدیا فیلتر

رآکتور بی‌هوازی همراه با بازچرخانی خارجی مطابق شکل (۳-۱۶)، همراه با غشا و مدیا فیلتر برای افزایش راندمان حذف و همچنین حذف آلاینده‌های نیتروژن و فسفر که در رآکتور (UASB) امکان حذف آن‌ها وجود ندارد، مناسب می‌باشد. راندمان حذف (BOD) در این سیستم تا ۹۸٪ افزایش می‌یابد [۳].



شکل ۲-۱۶ تصویر شماتیک از رآکتور بی‌هوازی همراه با بازچرخانی خارجی، غشا و مدیا فیلتر [۳]

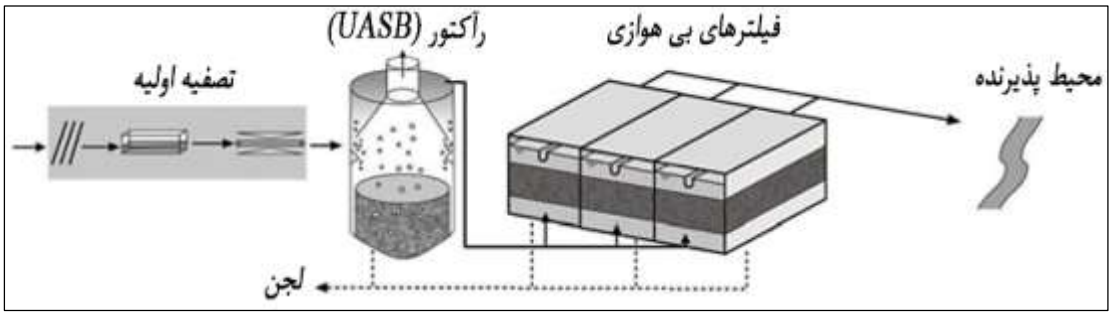
[1] Plug Flow

۲- ۵- ۴- سیستم‌های رآکتور مرکب و هیبرید

رآکتورهای بی‌هوازی مرکب و هیبرید را می‌توان بصورت واحدهای مجزا و یا یک واحد یکپارچه اجرا نمود [۱]. جهت افزایش راندامان حذف و یا اثربخشی فرآیند تصفیه بر روی یک آلاینده مشخص، رآکتور بی‌هوازی پتوی لجن جریان رو به بالا را همراه با یک سیستم تصفیه دیگر بسته به نیاز طراحی می‌کنند [۱].

۲- ۵- ۴- ۱- راکتور بی‌هوازی پتوی لجن جریان رو به بالا همراه با فیلترهای بی‌هوازی

استفاده همزمان از دو فرآیند تصفیه بی‌هوازی مطابق شکل (۳-۱۷)، هزینه بهره‌برداری را بطور چشمگیری کاهش می‌دهد [۱]. شاخص (BOD) در پساب تصفیه شده نهایی این سیستم کمتر از ۶۰ میلی‌گرم در لیتر برای مناطقی با جمعیت بیشتر از ۵۰،۰۰۰ نفر می‌باشد. حذف فیزیکی جامدات توسط مدیا و حذف مواد آلی محلول باقی‌مانده توسط زیست‌لایه تشکیل شده بر روی دانه‌های مدیا انجام می‌شود. این فرآیند در فیلترهای بی‌هوازی به افزایش راندامان حذف مواد آلی در این سیستم مرکب کمک می‌کند [۱].



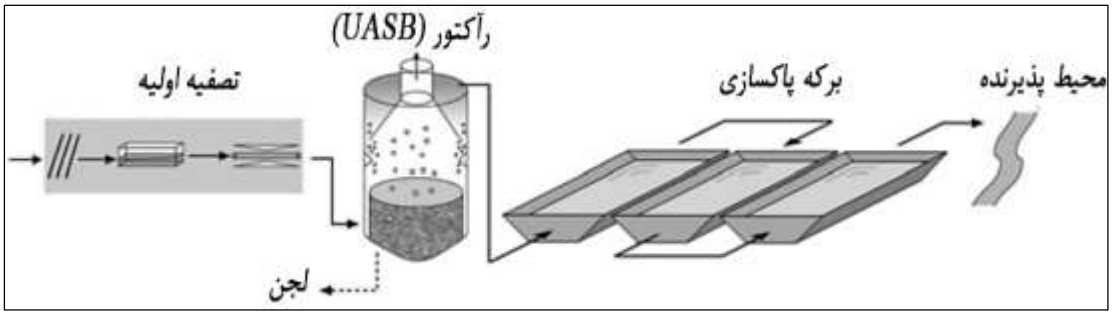
شکل ۲-۱۷ راکتور بی‌هوازی پتوی لجن جریان رو به بالا همراه با فیلترهای بی‌هوازی [۱]

۲- ۵- ۴- ۲- رآکتور بی‌هوازی پتوی لجن جریان رو به بالا همراه با برکه‌های پاکسازی

برکه‌های اختیاری[۱] بعنوان واحد پس‌تصفیه برای فرآیندهای تصفیه بی‌هوازی مورد استفاده قرار می‌گیرند. مطابق شکل (۳-۱۸)، رآکتور بی‌هوازی همراه با برکه‌های پاکسازی[۲] برای حذف پاتوژن‌های فاضلاب اثربخش می‌باشند [۱]. یکی از نقاط ضعف این سیستم، افزایش غلظت جلبک در پساب نهایی می‌باشد. برکه‌های پاکسازی بدلیل زمان ماند کمتر نسبت به برکه‌های تثبیت[۳] بعنوان واحد پس‌تصفیه استفاده می‌شوند؛ درحالیکه، برکه‌های تثبیت برای تصفیه فاضلاب خام بکار گرفته می‌شوند. استفاده از این سیستم در محدودیت زمین، جایگزین مناسبی برای سیستم برکه تثبیت با زمان ماند بالا می‌باشد [۱].

---

[۱] Facultative Ponds
[۲] Polishing Ponds
[۳] Stabilisation Ponds



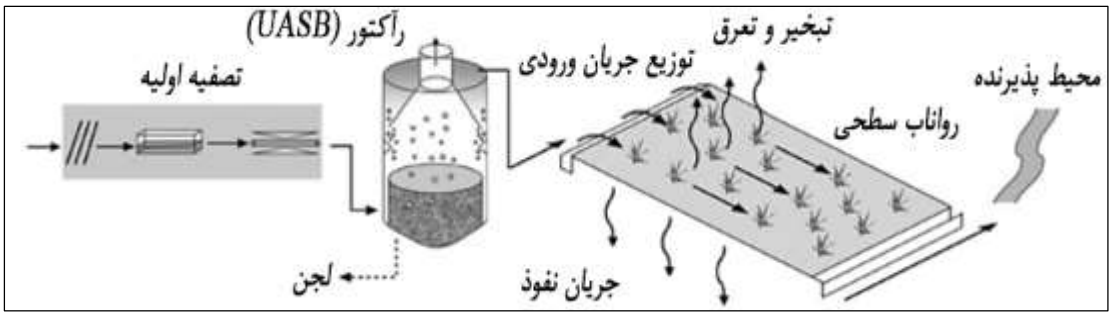
شکل ۲-۱۸ راکتور بی‌هوازی پتوی لجن جریان رو به بالا همراه با برکه‌های پاکسازی [۱]

۲- ۵- ۴- ۳- راکتور بی‌هوازی پتوی لجن جریان رو به بالا همراه با سیستم روانآب سطحی

راکتور بی‌هوازی (UASB) همراه با سیستم روانآب سطحی[۱] مطابق شکل (۱۹-۳)، امکان تبدیل مواد آلی به ترکیبات ساده و تجزیه‌پذیر را می‌دهد [۱]. این ترکیبات ساده شکل‌گرفته توسط میکرواورگانیسم‌ها برای رشد گیاهان مفید می‌باشند. مکانیسم حذف مواد آلی توسط سیستم روانآب سطحی، اکسیداسیون، ته‌نشینی و فیلتراسیون بر روی بستر خاک می‌باشد. راندمان حذف شاخص‌های (BOD) و (COD) برای سیستم روانآب سطحی ۴۸٪ تا ۵۲٪ می‌باشد؛ درحالیکه، این مقدار برای سیستم مرکب راکتور بی‌هوازی همراه با سیستم روانآب سطحی تا ۹۰٪ افزایش می‌یابد. برای کاهش جامدات معلق، سرعت عبور جریان روی سطح زمین بین ۰/۳ تا ۳ سانتی‌متر بر ثانیه حفظ می‌شود. حذف نیتروژن در این سیستم به چرخه جذب توسط گیاهان بستگی دارد. گیاهان ظرفیت حذف نیتروژن کل در حدود ۲۰٪ تا ۳۰٪ را دارند. این مقدار حذف به عمق ریشه‌های گیاهان، نحوه توزیع و نوع گیاهان، نرخ بار نیتروژن و یا نحوه و سرعت حرکت سیال بر روی خاک بستگی دارد. یکی دیگر از شاخص‌های اثرگذار در حذف نیتروژن، مقدار (BOD) می‌باشد؛ بنابراین، نسبت مناسب (BOD_5:N) برای حذف بهتر نیتروژن سه به یک (۳:۱) می‌باشد. راندمان حذف نیتروژن در این سیستم مرکب بسته به دما، زمان نگهداری فاضلاب روی بستر خاک و یا نرخ بار فاضلاب، در حدود ۷۵٪ تا ۹۰٪ می‌باشد. حذف فسفر در این سیستم مرکب بسته به ته‌نشینی و جذب در خاک و گیاهان بین ۸۴٪ تا ۸۹٪ تعیین شده است. راندمان حذف اورگانیسم‌های پاتوژنیک برای این سیستم مرکب قابل ملاحظه می‌باشد. حذف ۹۰٪ فکال کلیفرم، ۸۵٪ ویروس‌ها و حذف کامل تخم انگل پس از ۱۰ روز در این سیستم بررسی شده است. فرآیند حذف پاتوژن‌ها در این فرآیند به دو عامل، (۱) معرض نور خورشید و (۲) نوع خاک بستگی دارد. ضوابط طراحی سیستم روانآب سطحی برای مواردی مانند (۱) طول زمین، (۲) شیب زمین، (۳) نوع خاک، (۴) دوره بهره‌برداری و (۵) نرخ بار هیدرولیکی، به شرح زیر معرفی شده‌اند [۱]:

[۱] Overland flow (Surface runoff)

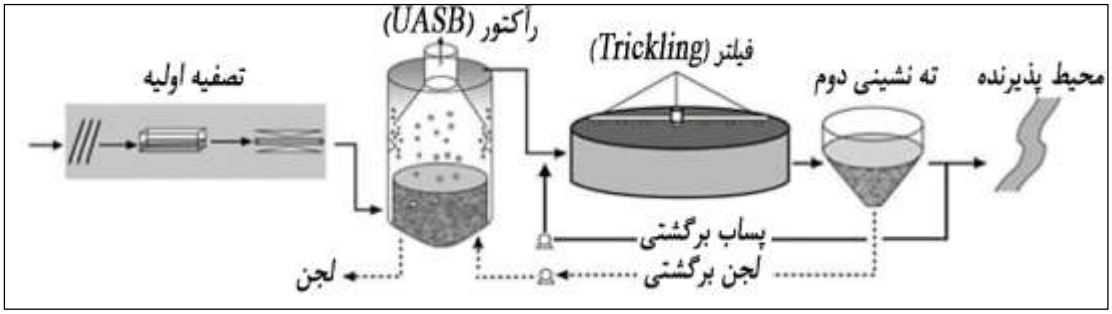
۱. طول زمین پیشنهادی برای جریان فاضلاب کم فشار بین ۳۰ تا ۴۵ متر و برای توزیع جریان پر فشار بین ۴۵ تا ۶۰ متر در نظر گرفته شود.
۲. شیب زمین پیشنهادی بین ۱٪ تا ۱۲٪ و مقدار بهینه آن بین ۲٪ تا ۸٪ در نظر گرفته شود.
۳. نوع خاک پیشنهادی با قابلیت نفوذ متوسط در حدود ۱۵ تا ۵۰ میلی‌متر در ساعت است.
۴. دوره بهره‌برداری مناسب بصورت ۴ روز تغذیه و ۲ روز استراحت است. نوبت تغذیه در بازه ۸ تا ۱۲ ساعت در روز توزیع جریان فاضلاب و ۱۶ تا ۱۲ ساعت در روز عدم توزیع جریان فاضلاب است.
۵. نرخ بار هیدرولیکی برای این سیستم مرکب بین ۰/۲ تا ۰/۴ مترمکعب بر مترمربع در روز است.



شکل ۲-۱۹ رآکتور بی‌هوازی پتوی لجن جریان رو به بالا همراه با سیستم روانآب سطحی [۱]

۲- ۵- ۴- ۴- رآکتور بی‌هوازی پتوی لجن جریان رو به بالا همراه با صافی چکنده

صافی چکنده[۱] شامل موادی با نفوذپذیری بالا می‌باشد که با ایجاد زیست‌لایه بر روی آن‌ها، تماس بین میکرواورگانیسم‌ها و مواد آلی ایجاد می‌شود. این سیستم بدلیل سادگی اجرا و هزینه بهره‌برداری پایین مطابق شکل (۲۰-۳)، یک واحد پس‌تصفیه مناسب برای رآکتور بی‌هوازی پتوی لجن جریان رو به بالا می‌باشد [۱].



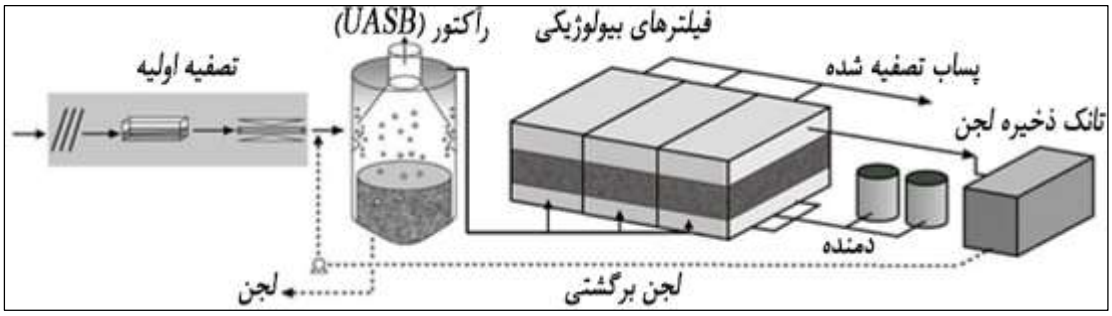
شکل ۲-۲۰ رآکتور بی‌هوازی پتوی لجن جریان رو به بالا همراه با صافی چکنده [۱]

[۱] Trickling filter

۲- ۵- ۴- ۵- رآکتور بی‌هوازی پتوی لجن جریان رو به بالا همراه با بیوفیلتر هوازی غوطه‌ور

بیوفیلترهای هوازی غوطه‌ور[۱] مطابق شکل (۲۱-۳)، بصورت واحد پس‌تصفیه همراه با دمنده‌های هوا جهت ایجاد فرآیند هوازی در سیستم می‌باشند [۱]. بیوفیلترهای هوازی از سه فاز زیر تشکیل شده‌اند [۱]:

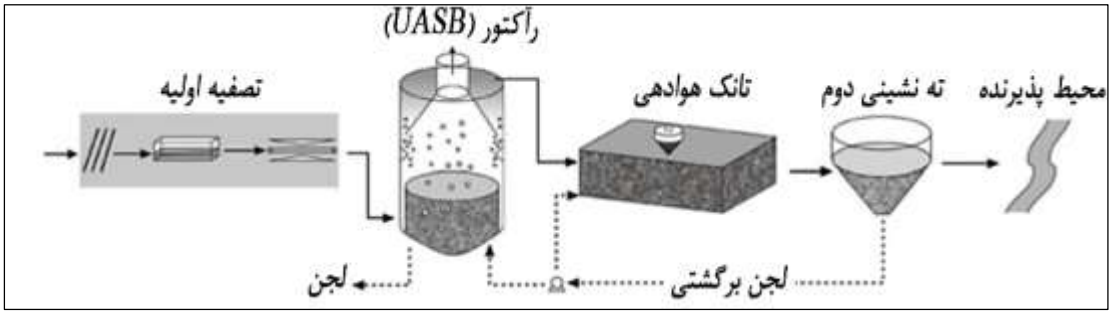
۱. فاز جامد، شامل مدیا فیلتر و اجتماع میکرواورگانیسم‌های تشکیل دهنده زیست‌لایه روی آن
۲. فاز مایع، شامل سیال جاری بر روی مدیا فیلتر
۳. فاز گاز، شامل هوادهی مصنوعی و همچنین زیست‌گازهای تولید شده با سهم کمتر



شکل ۲-۲۱ رآکتور بی‌هوازی پتوی لجن جریان رو به بالا همراه با بیوفیلتر هوازی غوطه‌ور [۱]

۲- ۵- ۴- ۶- رآکتور بی‌هوازی پتوی لجن جریان رو به بالا همراه با لجن فعال

فرآیند لجن فعال[۲] مطابق شکل (۲۲-۳)، شامل تانک هوادهی و ته‌نشینی دوم و خط بازچرخانی لجن می‌باشد [۱]. از رآکتور ناپیوسته متوالی (SBR)[۳] نیز بعنوان واحد پس‌تصفیه می‌توان استفاده کرد.



شکل ۲-۲۲ رآکتور بی‌هوازی پتوی لجن جریان رو به بالا همراه با لجن فعال [۱]

[۱] Submerged Aerated Biofilter
[۲] Activated Sludge
[۳] Sequencing Batch Reactor

۲- ۵- ۵- کیفیت پساب و راندمان حذف در سیستم‌های رآکتور مرکب

مطابق جدول (۶-۳)، متوسط کیفیت پساب تصفیه شده توسط رآکتور بی‌هوازی پتوی لجن جریان رو به بالا و همچنین سیستم‌های رآکتور مرکب برای شاخص‌هایی مانند (BOD_5)، (COD)، (SS)، (NH_3)، (Total Nitrogen)، (Total Phosphorus) و (Fecal Coliform) در فاضلاب خانگی معرفی شده‌اند [۱].

جدول ۲-۶ کیفیت پساب خروجی از رآکتور بی‌هوازی پتوی لجن جریان رو به بالا و مرکب [۱]

سیستم	متوسط کیفیت پساب تصفیه شده						
	BOD_5 (mg/L)	COD (mg/L)	SS (mg/L)	Ammonia (mg/L)	TN (mg/L)	TP (mg/L)	FC (FC/100mL)
UASB reactor	۱۰۰ - ۷۰	۲۷۰ - ۱۸۰	۱۰۰ - ۶۰	> ۱۵	> ۲۰	> ۴	$۱۰^۷$ - $۱۰^۶$
UASB + AS[1]	۵۰ - ۲۰	۱۵۰ - ۶۰	۴۰ - ۲۰	۱۵ - ۵	> ۲۰	> ۴	$۱۰^۷$ - $۱۰^۶$
UASB + SAB[2]	۵۰ - ۲۰	۱۵۰ - ۶۰	۴۰ - ۲۰	۱۵ - ۵	> ۲۰	> ۴	$۱۰^۷$ - $۱۰^۶$
UASB + anAF[3]	۸۰ - ۴۰	۲۰۰ - ۱۰۰	۶۰ - ۳۰	> ۱۵	> ۲۰	> ۴	$۱۰^۷$ - $۱۰^۶$
UASB + TF[4]	۶۰ - ۲۰	۱۸۰ - ۷۰	۴۰ - ۲۰	> ۱۵	> ۲۰	> ۴	$۱۰^۷$ - $۱۰^۶$
UASB + MP[5]	۷۰ - ۴۰	۱۸۰ - ۱۰۰	۸۰ - ۵۰	۱۵ - ۱۰	۲۰ - ۱۵	> ۴	$۱۰^۴$ – $۱۰^۲$
UASB + FAP[6]	۸۰ - ۵۰	۲۰۰ - ۱۲۰	۹۰ - ۶۰	> ۲۰	> ۳۰	> ۴	$۱۰^۷$ - $۱۰^۶$
UASB + CMAL[7]	۸۰ - ۵۰	۲۰۰ - ۱۲۰	۶۰ - ۴۰	> ۲۰	> ۳۰	> ۴	$۱۰^۷$ - $۱۰^۶$

1: Activated Sludge
2: Submerged Aerated Biofilter
3: Anaerobic filter
4: Trickling Filter
5: Maturation Pond
6: Facultative Aerated Pond
7: Complete Mix Aerated Lagoon

از طرفی مطابق جدول (۷-۳)، متوسط راندمان حذف برای شاخص‌هایی مانند (BOD_5)، (COD)، (SS)، (NH_3)، (Total Nitrogen)، (Total Phosphorus) و (Fecal Coliform) در رآکتور بی‌هوازی پتوی لجن جریان رو به بالا (UASB) بصورت مجزا و همچنین سیستم‌های رآکتور مرکب شامل، رآکتور (UASB) و فرآیندهای دیگر تصفیه مشخص شده‌اند [۱].

جدول ۲-۷ متوسط راندمان حذف در رآکتور بی‌هوازی پتوی لجن جریان رو به بالا و مرکب [۱]

سیستم	متوسط راندمان حذف						
	BOD_5 (%)	COD (%)	SS (%)	Ammonia (%)	TN (%)	TP (%)	FC (log Units)
UASB reactor	۷۵ - ۶۰	۷۰ - ۵۵	۸۰ - ۶۵	۵۰ >	۶۰ >	۳۵ >	۲ - ۱
UASB + AS[1]	۹۳ - ۸۳	۸۸ - ۷۵	۹۳ - ۸۷	۸۵ - ۵۰	۶۰ >	۳۵ >	۲ - ۱
UASB + SAB[2]	۹۳ - ۸۳	۸۸ - ۷۵	۹۳ - ۸۷	۸۵ - ۵۰	۶۰ >	۳۵ >	۲ - ۱
UASB + anAF[3]	۸۷ - ۷۵	۸۰ - ۷۰	۹۰ - ۸۰	۵۰ >	۶۰ >	۳۵ >	۲ - ۱
UASB + TF[4]	۹۳ - ۸۰	۸۸ - ۷۳	۹۳ - ۸۷	۵۰ >	۶۰ >	۳۵ >	۲ - ۱
UASB + MP[5]	۸۷ - ۷۷	۸۳ - ۷۰	۸۳ - ۷۳	۶۵ - ۵۰	۶۵ - ۵۰	> ۵۰	۵ - ۳
UASB + FAP[6]	۸۵ - ۷۵	۸۰ - ۶۵	۸۰ - ۷۰	۳۰ >	۳۰ >	۳۵ >	۲ - ۱
UASB + CMAL[7]	۸۵ - ۷۵	۸۰ - ۶۵	۸۷ - ۸۰	۳۰ >	۳۰ >	۳۵ >	۲ - ۱

1: Activated Sludge
2: Submerged Aerated Biofilter
3: Anaerobic filter
4: Trickling Filter
5: Maturation Pond
6: Facultative Aerated Pond
7: Complete Mix Aerated Lagoon

۲- ۶- شرایط و هماهنگی متناسب با رآکتور بی‌هوازی پتوی لجن جریان رو به بالا

رآکتور بی‌هوازی پتوی لجن جریان رو به بالا (UASB) برای مناطق روستایی و یا جوامع کوچک شهری، بدون دسترسی به آب و یا انرژی الکتریسیته ثابت مناسب نمی‌باشد [۸]. طراحی و ساخت این تکنولوژی به نسبت ساده است؛ اگرچه، رشد و توسعه لجن دانه‌ایی چند ماه زمان می‌گیرد. این رآکتور پتانسیل تولید پساب تصفیه شده با کیفیت بالاتر در یک حجم رآکتور کوچکتر را نسبت به تانک سپتیک دارد. اگرچه عملکرد فرآیند این سیستم برای تصفیه فاضلاب صنعتی در مقیاس بزرگ و همینطور نرخ بار آلی بالا (بیش از ۱۰ کیلوگرم (BOD) بر مترمکعب در روز) خوب ارزیابی شده است، اما استفاده از این سیستم برای فاضلاب خانگی به نسبت جدید می‌باشد. صنایع (۱) نوشیدنی، (۲) غذایی، (۳) خمیر و (۴) کاغذ، بدلیل حذف ۸۰٪ تا ۹۰٪ از شاخص (COD) در این رآکتور، اغلب از آن استفاده می‌کنند. هنگامی که فاضلاب خام ورودی دارای شدت کم و یا بلعکس شامل مقادیر بالای چربی، پروتئین و جامدات باشد؛ این رآکتور بدرستی کار نمی‌کند. دما نیز در این سیستم عامل کلیدی و موثر بر عملکرد می‌باشد [۸].

۲- ۷- جنبه‌های سلامت و بهداشت در رآکتور بی‌هوازی پتوی لجن جریان رو به بالا

نیروهای بهره‌برداری از رآکتور بی‌هوازی پتوی لجن جریان رو به بالا (UASB)، بایستی بصورت مداوم و منظم مورد سنجش ایمنی و سلامت قرارگیرند. پساب تصفیه شده و لجن همچنان برای سلامتی مخاطره‌آمیز و حاوی عوامل بیماری‌زا می‌باشند؛ بنابراین، نباید در تماس مستقیم و بدون محافظ با افراد قرارگیرند [۸].

تجهیزات و بخش‌های مختلف سیستم باید به صورت ویژه توسط افراد متخصص و تایید شده کنترل شوند [۲۲]. مطابق جدول (۸-۳)، بایستی تابلو و نشانه‌های لازم بر روی تجهیزات فرآیند تصفیه جهت محافظت از افراد نصب شوند. استفاده از تجهیزات حفاظتی افراد (PPD)[۱]در حین انجام کار، بهره‌برداری، تعمیر و نگهداری ضروری می‌باشند. علاوه بر نشانه‌های مشخص شده در جدول (۸-۳)، موارد زیر باید مورد نظر قرارگیرند [۲۲]:

۱. در تمام نقاط فعالیت، تابلوهای ایمنی گاز (CNG) نصب شوند.
۲. کپسول‌های ضد حریق در تمام نقاط خدمات‌رسانی و سوخت‌رسانی در دسترس باشند.
۳. نور کافی در محیط‌های کار و بهره‌برداری برای کاهش خطرهای احتمالی وجود داشته باشد.
۴. فقط با استفاده از تجهیزات و یا راه‌حل‌های نشت‌یابی تایید شده، نشت جستجو شود.
۵. کالیبراسیون تنها بوسیله ابزارهای مناسب انجام شود.

[۱] Personal Protective Devices

جدول ۲-۸ تابلو و نشانه‌های مورد نیاز بر روی سیستم استحصال زیست‌گاز [۲۲]

تابلو و نشانه	توضیحات
	استفاده از لباس مقاوم در برابر حرارت ضروری می‌باشد.
	استفاده از ماسک استاندارد در برابر گازها و بخارهای سمی ضروری می‌باشد.
	استفاده از دستکش در برابر جریان الکتریسیته و مواد شیمیایی ضروری می‌باشد.
	استفاده از کلاه ایمنی ضروری می‌باشد.
	استفاده از طناب حفاظتی حین انجام کار در ارتفاعات ضروری می‌باشد.
	استفاده از عینک و یا شیلد مخصوص در محیط مواد شیمیایی ضروری می‌باشد.
بر اساس مقررات و تجهیزات حفاظتی افراد در محیط کار (اتحادیه اروپا) – ۲۰۱۶-۴۲۵ (EU) No	

۲- ۸- بهره‌برداری و نگهداری از رآکتور بی‌هوازی پتوی لجن جریان رو به بالا

رآکتور بی‌هوازی پتوی لجن جریان رو به بالا (UASB)، یک تکنولوژی تصفیه متمرکز[۱] می‌باشد که باید بهره‌برداری و نگهداری از آن توسط نیروهای متخصص انجام شود [۸]. یک اپراتور ماهر برای نظارت، تعمیر و بررسی مشکلات پیش آمده در سیستم مانند رآکتور و یا پمپ نیاز است. لجن‌زدایی به ندرت و غیرمتناوب بصورت ۲ تا ۳ سال یکبار انجام می‌شود.

جهت بهره‌برداری مناسب از سیستم موارد زیر باید رعایت شوند [۸]:

- اطمینان خاطر از تماس حداکثری میان زیست‌توده و مواد هضم‌پذیر توسط جریان رو به بالا
- اجتناب از کاهش زمان ماند، جهت ایجاد شرایط مناسب برای تجزیه مواد آلی
- طراحی مناسب سیستم برای جداسازی حداکثری سه فاز
- ارزیابی مناسب و همیشگی لجن بر اساس ویژگی‌های متان‌سازی و ته‌نشینی آن

[۱] Centralized Treatment

مطابق جدول (۹-۳)، زمین مورد نیاز برای راه‌اندازی رآکتور بی‌هوازی پتوی لجن جریان رو به بالا همراه با نیروی لازم برای هوادهی، حجم لجن این سیستم و همچنین هزینه ساخت، بهره‌برداری و نگهداری مطرح شده‌اند [۱].

جدول ۲-۹ سرانه ویژگی‌های رآکتور بی‌هوازی پتوی لجن جریان رو به بالا [۱]

سیستم	سرانه شاخص‌های سیستم تصفیه فاضلاب							
	زمین مورد نیاز (m^2/inhab)	توان هوادهی		حجم لجن		هزینه	
		توان ساخت (W/inhab)	توان مصرفی (kWh/inhab*yr)	تصفیه لجن (L/inhab*yr)	آبگیری لجن (L/inhab*yr)	ساخت ($/inhab)	بهره‌برداری و نگهداری ($/inhab*yr)
UASB reactor	۰/۱ – ۰/۰۳	۰	۰	۲۲۰ - ۷۰	۳۵ - ۱۰	۲۰ - ۱۲	۱/۵ - ۱
UASB + AS[1]	۰/۲ - ۰/۰۸	۳/۵ - ۱/۸	۲۰ - ۱۴	۴۰۰ - ۱۸۰	۶۰ - ۱۵	۴۵ - ۳۰	۵ - ۲/۵
UASB + SAB[2]	۰/۱۵ - ۰/۰۵	۳/۵ - ۱/۸	۲۰ - ۱۴	۴۰۰ - ۱۸۰	۵۵ - ۱۵	۴۰ - ۲۵	۵ - ۲/۵
UASB + anAF[3]	۰/۱۵ - ۰/۰۵	۰	۰	۳۰۰ - ۱۵۰	۵۰ - ۱۰	۳۰ - ۲۰	۲/۲ - ۱/۵
UASB + TF[4]	۰/۲ - ۰/۱	۰	۰	۴۰۰ - ۱۸۰	۵۵ - ۱۵	۳۵ - ۲۵	۳ - ۲
UASB + MP[5]	۲/۵ - ۱/۵	۰	۰	۲۵۰ - ۱۵۰	۳۵ - ۱۰	۳۰ - ۱۵	۳ - ۱/۸
UASB + FAP[6]	۰/۳ - ۰/۱۵	۰/۶ - ۰/۳	۵ - ۲	۳۰۰ - ۱۵۰	۵۰ - ۱۵	۳۵ - ۱۵	۳/۵ - ۲
UASB + CMAL[7]	۰/۳ - ۰/۱	۰/۹ - ۰/۵	۸ - ۴	۳۰۰ - ۱۵۰	۵۰ - ۱۵	۳۵ - ۱۵	۳/۵ - ۲

* inhab: Inhabitant
1: Activated Sludge
2: Submerged Aerated Biofilter
3: Anaerobic filter
4: Trickling Filter
5: Maturation Pond
6: Facultative Aerated Pond
7: Complete Mix Aerated Lagoon

۲- ۹- مزایا و معایب رآکتور بی‌هوازی پتوی لجن جریان رو به بالا

مزایای رآکتور بی‌هوازی پتوی لجن جریان رو به بالا (UASB) به شرح زیر معرفی شده‌اند [۱، ۹]:

- راندمان بالای حذف شاخص (BOD) و (COD) (بین ۶۵٪ تا ۷۵٪)
- تثبیت و ته‌نشینی باکتری‌ها
- تحمل بار آلی بالا و قابلیت حذف در این شرایط
- تحمل بار هیدرولیکی بالا و قابلیت حذف در این شرایط
- تولید بسیار کم لجن
- لجن با قابلیت آب‌گیری مناسب
- نیاز لجن نهایی تنها به آب‌گیری و دفع
- نیاز به تعداد دفعات کم برای لجن‌زدایی
- امکان استحصال زیست‌گاز (متان)
- فرآیند برگشت لجن فعال بدون نیاز به پمپ
- ابعاد کوچکتر رآکتور در مقایسه با انواع دیگر روش تصفیه و نیاز به زمین کمتر
- هزینه‌های کم برای ساخت و بهره‌برداری
- اختلاط بدون مصرف انرژی با ایجاد یک چرخه فیزیکی (توسط حباب‌های گاز)
- زمان راه‌اندازی مجدد سریع پس از یک دوره وقفه (بدلیل ماندگاری بالای زیست‌توده)

معایب رآکتور بی‌هوازی پتوی لجن جریان رو به بالا (UASB) به شرح زیر معرفی شده‌اند [۱، ۹]:

- حساسیت نسبت به تغییرات بار و ترکیبات سمی
- راندمان پایین برای حذف کلیفرم
- در صورت بازاستفاده از پساب تصفیه شده در محیط حساس، نیاز به سیستم مجزا جهت حذف پاتوژن‌ها (معمولا نیاز به پس‌تصفیه می‌باشد)
- عدم حذف نیتروژن و فسفر در این سیستم
- تولید زیاد بو در طول فرآیند تصفیه
- نیاز به نیروی متخصص برای بهره‌برداری و نگهداری، بدلیل مشکلات در حفظ شرایط ثابت هیدرولیکی منظم (جریان رو به بالا و نرخ ته‌نشینی باید در تعادل باشند)
- کند بودن شروع زمان راه‌اندازی اولیه جهت رسیدن به فرآیند کامل (بین ۴ تا ۶ ماه)
- راندمان پایین برای فاضلاب با دمای کمتر از ۱۵ درجه سلسیوس

۲- ۱۰- نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج حاصل شده از این فصل، نتیجه‌گیری بدست آمده از این مطالعه به شرح زیر است:

- رآکتور بی‌هوازی پتوی لجن جریان رو به بالا (UASB)، یک فرآیند تصفیه بوسیله رشد معلق زیست‌توده و هضم مواد تجزیه‌پذیر در پتوی لجن می‌باشد؛ بنابراین، سرعت جریان رو به بالا یکی از فاکتورهای اساسی در طراحی و بهره‌برداری از این سیستم می‌باشد.

- به این دلیل که در رآکتور بی‌هوازی پتوی لجن جریان رو به بالا (UASB)، ناحیه ته‌نشینی و هضم درون یک سازه می‌باشند؛ در نتیجه، این سیستم شوک‌پذیری پایینی دارد. بدنبال این مساله رآکتور بی‌هوازی نیاز به مدیریت دقیق بهره‌برداری دارد. همچنین ایجاد یک واحد پیش‌تصفیه جهت کنترل آلاینده‌ها و رقیق‌سازی آن‌ها پیش از ورود به رآکتور لازم می‌باشد.

- سه اصل مهم در مورد ناحیه پتوی لجن درون رآکتور بی‌هوازی پتوی لجن جریان رو به بالا (UASB)، به ترتیب، (۱) غلظت میکرواورگانیسم‌های موجود در پتو، (۲) ضخامت پتوی لجن و (۳) فاصله‌ی پتو از کف مخزن می‌باشند. پایداری پتوی لجن به افزایش راندمان حذف کمک می‌کند.

منابع

References

[1]. Sperling, M.v., and de Lemos Chernicharo, C.A.: 'Biological wastewater treatment in warm climate regions', IWA, 2005.

[2]. Metcalf, L., Eddy, H.P., and Tchobanoglous, G.: 'Wastewater engineering: treatment, disposal, and reuse', McGraw-Hill New York, 1991.

[3]. Goli A, Shamiri A, Khosroyar S, Talaiekhozani A, Sanaye R, Azizi K.: 'A review on different aerobic and anaerobic treatment methods in dairy industry wastewater', Journal of Environmental Treatment Techniques, 2019, 7, (1), pp. 113-141.

[4]. Kaetzl, K., Lübken, M., Gehring, T., and Wichern, M.: 'Efficient low-cost anaerobic treatment of wastewater using biochar and woodchip filters', Water, 2018, 10, (7), pp. 818.

[5]. Morel, A., and Diener, S.: 'Greywater management in low and middle income countries, review of different treatment systems for households or neighbourhoods Sandec', 2006.

[6]. Tilche, A., and Vieira, S.: 'Discussion report on reactor design of anaerobic filters and sludge bed reactors', Water Science and Technology, 1991, 24, (8), pp. 193.

[7]. Adegoke, A., and Stenström, T.: 'Septic Systems', 2019.

[8]. Tilley, E., Ulrich, L., Lüthi, C., Reymond, P., and Zurbrügg, C.: 'Compendium of Sanitation Systems and Technologies', 2014.

[9]. Sasse, L.: 'Decentralised Wastewater Treatment in Developing Countries', 1998.

[10]. Singh ,R.L., Singh, R.P., Gupta, R., and Singh, R.: 'Advances in biological treatment of industrial waste water and their recycling for a sustainable future', Springer, 2019.

[11]. Young, J.C., and Dahab, M.F.: 'Effect of media design on the performance of fixed-bed anaerobic reactors', Water Science and Technology, 1983, 15, (8-9), pp. 369-383.

[12]. Merino-Solís, M.L., Villegas, E., De Anda, J., and López-López, A.: 'The effect of the hydraulic retention time on the performance of an ecological wastewater treatment system: an anaerobic filter with a constructed wetland', Water, 2015, 7, (3), pp. 1149-1163.

[13]. Zhou, H., and Xu, G.: 'Integrated effects of temperature and COD/N on an up-flow anaerobic filter-biological aerated filter: Performance, biofilm characteristics and microbial community', Bioresource technology, 2019, 293, pp. 122004.

[14]. Handayani, N.I., Yuliasni, R., Setianingsih, N.I., and Budiarto, A.: 'Full scale application of integrated upflow anaerobic filter (UAF)-constructed wetland (cws) in small scale batik industry wastewater treatment', Jurnal Riset Teknologi Pencegahan Pencemaran Industri, 2020, 11, (1), pp. 27-35.

[15]. Maldonado-Maldonado, J.I., Márquez-Romance, A.M., Guevara-Pérez, E., Pérez, S., and Rey-Lago, D.: 'Model development for the design of an anaerobic upflow filter separated in two and three phases', Dyna, 2018, 85, (207), pp. 44-53.

[16]. Ma, D., Wang, J., Li, H., Che, J., and Yue, Z.: 'Simultaneous removal of COD and NH4+-N from domestic sewage by a single-stage up-flow anaerobic biological filter based on Feammox', Environmental Pollution, 2022, 314, pp. 120213.

[17]. UNEP, A.: 'Directory of Environmentally Sound Technologies for the Integrated Management of Solid, Liquid and Hazardous Waste for Small Island Developing States (SIDS) in the Pacific Region', International Waters Learning Exchange & Resource Network Report, 2021.

[18]. Technologien, N., and Wirtschaftsberatung, B.-u.: 'Anaerobic treatment of municipal wastewater in UASB-reactors', TBW GmbH: Frankfurt, Germany, 2001.

[19]. Gomiero, F.Z., Knopik, M.A., Velho, J.C.M., Gonçalves, J.E., and Velho, L.F.M.: 'Evaluation of the recirculation process of aerobic sludge from a percolating biological filter in an upflow anaerobic sludge blanket digestion reactor, with characterization of sludge solids', Desalination and Water Treatment, 2021, 233, pp. 52-61.

[20]. Saghir, A., and Hajjar, S.: 'Biological Treatment of Slaughterhouse Wastewater using Up flow Anaerobic Sludge Blanket (UASB)-anoxic-aerobic system ,'Scientific African, 2022, pp. e01236.

[21]. Azimi, A., and Zamanzadeh, M.: 'Determination of design criteria for UASB reactors as a wastewater pretreatment system in tropical small communities', International Journal of Environmental Science & Technology, 2004, 1, (1), pp. 51-57.

[22]. HYDROUSA: 'Water in the context of circular economy', 2018.

[23]. Bodik, I., Herdova, B., and Drtil, M.: 'Anaerobic treatment of the municipal wastewater under psychrophilic conditions', Bioprocess Engineering, 2000, 22, (5), pp. 385-390.

[24]. Ayati, B., and Ganjidoust, H.: 'Comparing the efficiency of UAFF and UASB with hybrid reactor in treating wood fiber wastewater', 2006.

[25]. Rose, G.D.: 'Community-based technologies for domestic wastewater treatment and reuse: options for urban agriculture', Cities feeding people series; rept. 27, 1999.

[26]. Weiland, P., and Rozzi, A.: 'The start-up, operation and monitoring of high-rate anaerobic treatment systems: discusser's report', Water Science and Technology, 1991, 24, (8), pp. 257-277.

[27]. Bull, M., Sterritt, R., and Lester, J.: ‘An evaluation of four start-up regimes for anaerobic fluidized bed reactors’, Biotechnology Letters, 1983, 5, (5), pp. 333-338.

[28]. Puñal, A., Trevisan, M., Rozzi, A., and Lema, J.M.: ‘Influence of C:N ratio on the start-up of up-flow anaerobic filter reactors’, Water Research, 2000, 34, (9), pp. 2614-2619.

[29]. Van Lier, J.B., Mahmoud, N., and Zeeman, G.: ‘Anaerobic wastewater treatment’, Biological wastewater treatment: principles, modelling and design, 2008, pp. 415-456.