

بررسی روش های زیستی مدیریت لجن تصفیه خانه فاضلاب شهری

چکیده

آب مفیدترین و مهمترین منبع حیات است و زندگی به آن وابسته است. هنگامی که فاضلاب تصفیه می‌شود تا به محیط برگردد، یک محصول جانبی نیمه جامد و ماده مغذی غنی که لجن نامیده می‌شود تولید می‌گردد. مدیریت این محصول جانبی، به طوری که کمترین تاثیر بر طبیعت و سلامت انسان ها داشته، استانداردهای محیط زیستی را نیز پاسخ دهد و از طرفی دیگر از نظر اقتصادی امکان پذیر باشد مدنظر است. هزینه پردازش و تصفیه لجن بیش از 40% کل هزینه‌های تصفیه خانه ها می باشد. روش های معمول مدیریت لجن شامل: دفع، کشاورزی، کاربرد در زمین و سوزاندن می باشد. بیش از 30 تا 50% لجن تولیدی در کشورهای جهان به منظور مصارف کشاورزی پردازش شده و مصرف می گردد. پس از آن کاربرد در زمین به عنوان روشی معمول در مدیریت لجن است به طوری که بیش از 20-30% لجن تولیدی به منظور حاصل خیزی زمین های بایر و یا غنی سازی خاک جنگلی مورد استفاده قرار می گیرد. روش های نوینی مانند تولید انرژی زیستی نیز در سالهای اخیر مورد توجه قرار گرفته است که برخی از آنها در مرحله مطالعه می باشد مانند تولید بیودیزل از لجن اولیه و ثانویه. اکنون که در کشور ما اتخاذ یک یا چند روش برای مدیریت لجن در دست بررسی است فرصت مناسبی جهت مطالعه پیرامون انواع این روش ها می باشد.

کلمات کلیدی

لجن، تصفیه خانه فاضلاب، کلاس بندی، سوخت زیستی، دفع، کشاورزی

مقدمه

با گسترش روزافزون جمعیت، میزان فاضلاب تولیدی نیز افزایش قابل توجهی یافته است. تصفیه خانه های مورد استفاده به منظور تصفیه فاضلاب از روشهای متداول فیزیکی و بیولوژیکی برای تصفیه فاضلاب استفاده می‌کنند اما امروزه فرایند لجن فعال بطور گسترده ای برای تصفیه بیولوژیکی در سرتاسر جهان استفاده می‌شود. علت اصلی استفاده از این روش اقتصادی بودن و راهبرد آسان آن است. همچنین کیفیت پساب تولیدی در این تصفیه خانه ها قابل قبول است. اما در نتیجه استفاده از این روش مقدار قابل ملاحظه ای لجن مازاد دفعی تولید می‌شود که باید دفع شود. از جهتی دیگر تصفیه فاضلاب در چندین ساعت انجام می شود، در حالیکه پردازش لجن تولید شده و آماده سازی آن برای دفع یا استفاده مفید در چندین روز و یا حتی در چندین هفته صورت می گیرد و مستلزم استفاده از تجهیزات پیچیده بیشتری است. به این دلیل است که هزینه مدیریت لجن 40 تا 50 درصد کل هزینه‌های تصفیه فاضلاب است [1]. بنابراین عمل‌آوری، استفاده مجدد و دفع لجن فاضلاب بایستی با توجه به هزینه اثر بخشی مدیریت شده و قوانین زیست‌محیطی و بهداشتی در این زمینه مورد توجه قرار گیرند. یکی از مهمترین اهداف در استفاده مجدد و دفع لجن فاضلاب و نیز هنگام عمل‌آوری لجن از بین بردن میکروبهای بیماری‌زا و کاهش جذب ناقلین است. مدیریت غلط و نادرست استفاده مجدد از لجن باعث بروز خطراتی هم برای سلامتی عمومی و هم برای محیط‌زیست خواهد شد. آلاینده‌های بالقوه در لجن شامل نیتروژن، فلزات، پاتوژن‌ها و ترکیبات آلی مصنوعی می‌باشد [2].

مجله زیست فن

سوال مهمی که بوجود می‌آید این است که آیا لجن کلاً یک نخاله و محصول زائد است؟ آیا می‌توان آن را به عنوان یک منبع مورد استفاده قرار داد؟ و می‌توان پاسخ داد که مطمئناً لجن غیر قابل استفاده نمی‌باشد ولی در صورت دورریز بدون هیچ فرآوری، باعث تبدیل لجن به نخاله می‌گردد. در این مقاله طبقه بندی لجن تولیدی مورد بررسی قرار گرفته و همچنین سعی شده است روش های معمول در جهان برای مدیریت لجن بررسی و مورد مقایسه قرار گرفته شود. با توجه به نتایج منتشر شده و آنالیزهای صورت گرفته بر روی لجن های تولیدی تصفیه خانه های ایران، این لجن ها دارای کلاس B بوده و برای استفاده باید مورد پردازش قرار گیرند که روش پردازش آن محل بحث است. روش های زیستی در مدیریت لجن به دلیل اقتصادی بودن و عملکرد مورد قبول برخی از این روش ها نسبت به روش های شیمیایی و یا فیزیکی مورد توجه کشورها قرار گرفته است که برخی از این روش های نوین در این مقاله مورد بررسی قرار خواهد گرفت و چالش های پیش روی آنها بررسی خواهد شد.

۱. کلاس بندی لجن

در سال 1993 قوانینی توسط EPA سازمان محیط زیست آمریکا منتشر شد که بر اساس این قوانین باید لجن از نظر فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی بررسی شده و کلاس بندی شود [3]. لجن تولیدی بر اساس مشخصات فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی به دو دسته کلاس A و B طبقه بندی می‌شود. جدول (1) نشان دهنده مقررات لجن کلاس A است که برای کاربرد در زمین می‌باشد. لجن تولید شده در تصفیه خانه های ایران تا به امروز کلاس B بوده است که بر اساس قوانین محیط زیست برای استفاده و کاربرد آن نیاز است که کلاس لجن ارتقا یابد. برای این منظور روش های مختلفی در دنیا مورد استفاده قرار می‌گیرد [4]. از جهت دیگر عموماً 92 تا 98 درصد حجم لجن از آب بوده و قسمت باقیمانده آن نیز از مواد آلی فسادپذیر (ناپایدار) تشکیل یافته است. میزان بالای مواد آلی در لجن نیاز به تصفیه بیشتر را قبل از تخلیه و دفع نهایی آن می‌طلبد.

جدول 1. غلظت مجاز و نرخ بارگذاری جامدات بیولوژیکی برای کاربرد در زمین کلاس A [3]

غلظت مجاز	نرخ سالانه بار گذاری	نرخ بار گذاری تجمعی	سقف مجاز غلظت	غلظت مجاز	فلزات سنگین
41	2.00	41	75	41	آرسنیک
39	1.9	39	85	39	کادمیوم
1500	75	1500	4300	1500	مس
300	15	300	840	300	سرب
17	0.85	17	57	17	جیوه
-	-	-	75	-	مولیبدن
420	21.00	420	420	420	نیکل
36	5.00	36	100	36	سلنیوم
41	2.00	41	7500	2800	روی

۲. روش های رایج مدیریت لجن و کاربردهای لجن

مشخصات فاضلاب از شهری به شهر دیگر متفاوت است این امر به این دلیل است که از فرایندهای فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی مختلفی برای حذف مواد آلی و معدنی از فاضلاب استفاده می‌شود. به همین دلیل ابتدا از لجن تولیدی بعد از هاضم و پس از ذخیره سازی نمونه برداری می‌شود تا لجن از نظر شیمیایی، فیزیکی و بیولوژیکی مورد بررسی قرار گرفته و کلاس بندی شود. سپس فرایندهای مناسب در تصفیه لجن خام اتخاذ می‌گردد. روش های متداول مدیریت لجن شامل 1- کاربرد کشاورزی و استفاده در زمین 2- کمپوست 3- سوزاندن 4- دفع 5- روش های دیگر [5, 6]. استفاده و بهره گیری از هر یکی از روش های معمول در پردازش و استفاده از لجن بستگی به شرایط لجن، حجم تولید و شرایط محیطی آن منطقه داشته و با اتخاذ یک روش مناسب می‌توان علاوه بر حل مشکل انباشتگی و آلودگی لجن، به آن به عنوان یک کالا نگریست که دارای جنبه اقتصادی نیز می‌باشد.

مجله زیست فن

اتخاذ هر یک از این روش ها وابسته به شرایط محیطی است به طور مثال در ژاپن لجن معمولاً سوزانده می‌شود زیرا زمین اندکی در اختیار دارد ولی در کشور آمریکا در سال 2012 بیش از 605 میلیون تن لجن خشک در آمریکا تولید شد که بیش از 60% این لجن-ها در سال 2004 به صورت کاربرد در زمین مورد استفاده قرار گرفت؛ زیرا لجن می‌تواند بیش از 50% مواد مغذی آلی خاک را تأمین کند پس می‌توان گفت استفاده از لجن باعث بهبود شرایط فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک می‌شود. به گونه ای که در مطالعات منتشر شده نسبت به کودهای شیمیایی عملکرد بهتری را از خود نشان داده است. جدول (2) نشان دهنده ی روش های معمول برای مدیریت لجن در برخی از شهرها است. روش های دیگر ذکر شده شامل تولید ورمی کمپوست، استفاده به عنوان پوشش در محل های دفن زباله و ... است که به دلیل کاربردهای خاص و شرایط استفاده، معمول نمی‌باشد. با نگاهی به تاریخچه استفاده و مدیریت لجن در کشورهای صنعتی جهان می‌توان دریافت که بیشتر این کشورها به سمت بهره گیری و استفاده اقتصادی از لجن روی آورده اند. به شکلی که در سال 2000 استفاده کشاورزی در کشور سوئد 21% بوده که در سال 2012 به 60% افزایش یافته است [7, 8].

جدول 2. حجم لجن تولیدی و سهم هر یک از روش‌های معمول برای مدیریت لجن در این کشورها در سال 2010 [8, 9].

کشور	لجن خشک تولیدی (t/a)	روش های مدیریت لجن (%)		
		کشاورزی	سوزاندن	دفع
سوئیس	250000	50	20	30
آلمان	2750000	25	10	65
دانمارک	150000	43	28	29
سوئد	180000	60		40
هلند	180000	53	10	29
استرالیا	250000	28	37	35
ایتالیا	800000	34	11	55
اسپانیا	23000	61	-	10
پرتغال	300000	80	-	12
بریتانیا	1500000	51	5	16
فرانسه	900000	27	20	53
امریکا	7690000	45	3	21
ژاپن		9	55	

۳. روش های زیستی در مدیریت لجن

تولید کمپوست

با توجه به موقعیت جغرافیایی و آب و هوایی شهرهای کشور و وجود زمین های بایر فراوان در اطراف شهرها و همچنین ویژگی های خاص لجن تولیدی در تصفیه خانه ایران که بخش اعظم آن ها را مواد آلی تشکیل می دهد، تولید کمپوست می تواند مدنظر قرار گیرد. تولید کمپوست با استفاده از باکتری ها و میکروارگانیسم های هوازی امکان پذیر شده است در فرآیند کمپوست سازی، فعالیت زیستی پیچیده، باعث افزایش دمای توده لجن شده و از این طریق بسیاری از باکتری ها و انگل های بیماری زا از بین می‌رود و از طرفی دیگر، مصرف جامدات فرار و کاهش مواد آلی باعث تثبیت توده لجن شده و تولید کمپوست می‌گردد. عواملی مانند دما، رطوبت، pH، مواد مغذی آلی و غلظت اکسیژن در این فرایند نقش تعیین کننده ای دارند و تمامی این پارامترها باید در طی فرایند، کنترل و بهینه سازی شود تا کمپوستی با کلاس بالا تولید گردد. تهیه کمپوست از لجن سه روش کلی دارد که عبارتند از:

Windrow، Aerated static pile، In-vessel systems. اصول دو روش اول یکسان می‌باشد ولی تجهیزات مورد استفاده آنها باهم متفاوت است مانند نحوه پوشاندن و محافظت از بارش باران و ...

کمپوست تولیدی از لجن به دو کلاس A و B طبقه بندی می‌شود. مهم ترین تفاوت در استفاده از این دو کمپوست اینست که برای استفاده از کمپوست کلاس B محدودیت هایی اعمال شده است. به منظور دستیابی به کلاس A با توجه به روش های ذکر شده نیاز به موارد زیر است: سه روز زمان و دمای $55^{\circ}C$ با استفاده از Aerated static pile و یا داخل راکتور. این مدت زمان در روش ویندرو تا 15 روز در همان دما افزایش می‌یابد [10].

البته باید توجه داشته که با مطالعات جدید صورت گرفته استفاده از کمپوست لجن دور از خطر نمی‌باشد و نیازمند طرحی جامع و مطالعه ی بیشتر است زیرا با وجود بهره گیری از این روش، برخی بیماری ها در مناطقی که از کمپوست استفاده شده است افزایش یافته و در حال حاضر بسیاری از کشورها و سازمان های محیط زیست در حال بررسی این نتایج و آزمایشات جدید می‌باشند.

تولید سوخت زیستی با استفاده از لجن

با توجه به مشکلات پیشرو جهان با کاهش منابع سوختی استفاده از سوخت های زیستی بیش از پیش مورد توجه است و از جهتی دیگر بسیاری از کشورها با مشکل تولید لجن و مدیریت آن روبرو هستند. ایران با وجود داشتن منابع فسیلی نسبت به سایر کشورها با این دو مشکل در سالهای آینده روبرو خواهد بود بگونه ی که هم اکنون نیز وجود انباشتگی لجن تولیدی در تصفیه خانه های تهران بیانگر وخامت این مشکل زیست محیطی است.

یکی از روش های بهره گیری از لجن به عنوان سوخت زیستی، استفاده از هاضم های بی هوازی می‌باشد. در این روش، لجن با استفاده از باکتری های بی هوازی هضم می‌شود در طی این فرایند، باکتری های متان زا فعالیت عمده داشته و گاز متان تولید می‌شود. استفاده از هاضم های بی هوازی علاوه بر حذف مواد آلی که در جدول (4) آورده شده است تولید گاز متان را به همراه دارد.

جدول 3. میزان حذف مواد آلی در مراجع

مرجع	میزان حذف مواد آلی	منبع
استاندارد EPA	کمتر از 38	[11]
استاندارد IWA	40-55	[12]
استاندارد DWE	45-50	[13]
استاندارد EE	کمتر از 40	[14]
متکف و اددی	45-60	[15]

در حال حاضر هاضم های تصفیه خانه جنوب تهران بزرگترین هاضم های بی هوازی ساخته شده در کشور می‌باشند که ظرفیت تولید آنها بیش از $35000 \text{ m}^3/\text{d}$ می‌باشد که با پروژه افزایش ظرفیت این تصفیه خانه و ساخت مدول های 7 و 8 این ظرفیت افزایش چشمگیری خواهد داشت.

میزان تولید گاز در هاضم را نیز با روش های زیستی و یا شیمیایی می‌توان افزایش داد مانند بهره گیری از گاز ازون قبل از ورود لجن به هاضم بی هوازی که باعث افزایش فروپاشی سلول ها در فرایند هضم شده و در برخی مطالعات میزان گاز تولید تا دو برابر افزایش یافته است [16] و یا بهره گیری از سوبه های مشخصی از ریزجلبک یا باکتری که دارای عملکرد خوبی در طی فرایند هضم بوده و باعث افزایش بازدهی هاضم ها هوازی یا بی هوازی شده‌اند [17].

از دلایل پایین بودن راندمان هاضم های بی هوازی کم بودن نسبت کربن به نیتروژن می‌باشد (C/N) که در طی تحقیقات جدید صورت گرفته، از پساب خروجی تصفیه خانه فاضلاب شهری که به عنوان محیط کشت ریزجلبک (به دلیل محتوای نیتروژن و فسفات) استفاده می‌شود و سپس بهره گیری از آن به عنوان co-substra در هاضم بی هوازی برای تولید بیوگاز، باعث کاهش زمان

ماند در هاضم شده همچنین در برخی منابع تا 20% میزان گاز تولیدی و راندمان هاضم را افزایش داده است [18] همچنین کیفیت لجن هضم شده با استفاده از این روش افزایش چشمگیری داشته است [18, 19]. مطالعه ی که در سال 2014 توسط اولون و همکاران انجام شده با ترکیب 12% ریزجلیک به 88% لجن، بازده هاضم در دمای 37°C بیشتر از 24% افزایش یافت ولی در دمای 55°C این راندمان تا 8% کاهش یافت [20]. روندی مشابه در سایر مطالعات صورت گرفته نیز مشاهده شده است که با افزایش دما راندمان هاضم که خوراک ورودی ترکیبی از لجن و جلبک است به جای افزایش، گاهی کاهش را نیز نشان داده است [18].

روش دیگر تولید بیودیزل از لجن و یا اسکام (scum) می باشد که در سالهای اخیر بر روی آن مطالعاتی صورت گرفته است طی یک بررسی و امکان سنجی اقتصادی و علمی در جهت تولید متیل استرهای اسید چرب (FAMES) در مقیاس بالا، از حلال متانول برای استخراج بهره گرفته شد. در این مطالعه لجن اولیه با میزان تولید 14.5% و لجن ثانویه با 2.5%، با استفاده از متانول و لجن با نسبت 12:1 بوده است. در این مقاله هزینه تولید 3.23 دلار به ازای هر گالن با بازده 10 FAMES/Dry weight sludge% پیش بینی شده است [21]. در مطالعه ی دیگر بازده متیل استر تولید شده از لجن فاضلاب شهری 24% گزارش شده است [22]. البته باید توجه داشت که چالش های بسیاری پیش روی تولید بیودیزل از لجن است مانند جمع آوری و خشک کردن، پردازش میکروبی، بهینه سازی تولید بیودیزل و جداسازی آن، کیفیت محصول خروجی، طراحی رآکتور تولیدی و نگرانی های دستگاه های نظارتی بر روی تولیدات این روش است اما می توان مهمترین عامل پیش رو را خشک کردن لجن دانست که بیش از 41.5% هزینه تولید را دارا است

۴. جمع بندی

با گسترش و ساخت تصفیه خانه های فاضلاب در ایران و بهره برداری از تصفیه خانه های بزرگی مانند تصفیه خانه جتوب تهران، کشور ایران مانند سایر کشورهای در حال توسعه با مشکل تازه ی روبروست و آن لجن تولیدی این تصفیه خانه ها می باشد که با گذشت زمان سیر صعودی را طی می کند.

از دو جهت می توان برای حل این مشکل پرداخت:

1- کاهش میزان لجن تولدی و افزایش کیفیت آن بوسیله فرایند تصفیه بهینه

2- مدیریت لجن طبق استانداردهای جهانی

در سال های اخیر اغلب کشورهای در حال توسعه روش های مدیریت لجن خود را بهبود بخشیده اند. روش های معمول که تاکنون برای مدیریت لجن بکار گرفته شده است شامل بازیافت، سوزاندن، دفن بهداشتی و تهیه کمپوست با استفاده از سیستم های سنتی، نیمه صنعتی و مدل های پیشرفته هوازی و غیرهوازی است. همچنین توجه به سمت روش های نوین نیز می باشد مانند تولید بیودیزل و یا بهره گیری از روش های نوین برای تصفیه و کاهش میکروارگانسیم های بیماری زا در لجن تا به عنوان یک توده غنی از ترکیبات آلی مورد استفاده قرار گرفته شود. ایران نیز تیزامند چندین مطالعه جامع برای مدیریت راهبردی است. همچنین باید در نظر داشت که استفاده از لجن در کشاورزی، تولید سوخت زیستی و... می تواند دارای نقاط مثبت بسیاری باشد اما مخاطرات زیست محیطی آن نیز باید با دقت مورد بررسی قرار گیرد.

مراجع:

- [۱] Zhang L., Xu C., Champagne P., and Mabee W.: **Overview of current biological and thermo-chemical treatment technologies for sustainable sludge management.** *Waste Management & Research* 2014, 32: 586-600.
- [۲] Lu Q., He Z. L., and Stoffella P. J.: **Land application of biosolids in the USA: a review.** *Applied and Environmental Soil Science* 2012, 2012 :
- [۳] Stein L., Boulding R., Helmick J., and Murphy P.: **Process design manual: land application of sewage sludge and domestic septage.** *Cincinnati, Ohio: US Environmental Protection Agency* 1995 ,

- [4] فرزادکیا م., میرزایی ر., غفارخانی م., باقری ف.: ارزیابی کیفیت میکروبی پساب و لجن دفعی از چهار تصفیه خانه فاضلاب موضعی شهر تهران **Microbial quality assessment of disposal effluent and sludge from four decentralized wastewater**. 2014
- [۵] Nyssönen V.: **Sewage Sludge Treatment for Energy Purpose in China: Waste Treatment in China**. 2015 ,
- [۶] Mantovi P., Baldoni G., Dal Re L., Piccinini S., and Rossi L.: **Effects of 15 years sludge application on cropland**. *Water Practice and Technology* 2007, 2: wpt2007015.
- [۷] Sewage I. S. W. A. W. G. o. and Sludge W., *Sludge treatment and disposal: management approaches and experiences*: Office for official publications of the European communities, 1998.
- [۸] Kelessidis A. and Stasinakis A .S.: **Comparative study of the methods used for treatment and final disposal of sewage sludge in European countries**. *Waste management* 2012, 32: 1186-1195.
- [۹] Chang M.-W., Chung C.-C., Chern J.-M., and Chen T.-S.: **Dye decomposition kinetics by UV/H₂O₂: initial rate analysis by effective kinetic modelling methodology**. *Chemical Engineering Science* 2010, 65: 135-140.
- [۱۰] Andreoli C. V., von Sperling M., and Fernandes F., *Sludge treatment and disposal* vol. 6: IWA publishing, 2007.
- [۱۱] EPA: **standard for use or disposal of sewage sludge** 1993 ,
- [۱۲] Andreoli C. V., Von Sperling M., Fernandes F., and Ronteltap M., *Sludge treatment and disposal*: IWA publishing, 2007.
- [۱۳] ATV-DVWK: **Biological stabilisation of sewage**. 2003 ,
- [۱۴] Hall J.: **Sewage sludge production, treatment and disposal in the European Union**. *Water and Environment Journal* 1995, 9: 335-343.
- [۱۵] Tchobanoglous G., Burton F., and Stensel H.: **Wastewater Engineering: Treatment and Reuse, 5th edn. Metcalf and Eddy**. ed: McGraw-Hill series in civil and environmental engineering. McGraw-Hill, New York, 2014.
- [۱۶] Chacana J., Alizadeh S., Labelle M.-A., Laporte A., Hawari J., Barbeau B., *et al.*: **Effect of ozonation on anaerobic digestion sludge activity and viability**. *Chemosphere* 2017, 176: 405-411.
- [۱۷] Ju L.-K. and Trivedi H. K.: **Digestion of Waste Activated Sludge with Algae**. ed: Google Patents, 2015.
- [۱۸] Wang M. and Park C.: **Investigation of anaerobic digestion of Chlorella sp. and Micractinium sp. grown in high-nitrogen wastewater and their co-digestion with waste activated sludge**. *Biomass and Bioenergy* 2015, 80: 30-37.
- [۱۹] Thorin E., Olsson J., Schwede S., and Nehrenheim E., "Biogas from Co-digestion of Sewage Sludge and Microalgae," in *The 8th International Conference on Applied Energy-ICAEE2016*, 2۰۱۶
- [۲۰] Olsson J., Feng X. M., Ascue J., Gentili F. G., Shabiimam M. A., Nehrenheim E., *et al.*: **Co-digestion of cultivated microalgae and sewage sludge from municipal waste water treatment**. *Bioresource Technology* 11// 2014, 171: 203-210.
- [۲۱] Mondala A., Liang K., Toghiani H., Hernandez R., and French T.: **Biodiesel production by in situ transesterification of municipal primary and secondary sludges**. *Bioresource Technology* 2// 2009, 100: 1203-1210.
- [۲۲] Demirbas A., Bamufleh H. S., Edris G., and Al-Sasi B. O.: **Biodiesel production from lipids of municipal sewage sludge by direct methanol transesterification**. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects* 2017, 39: 800-805.