

استفاده از لجن تصفیه خانه‌های فاضلاب در تولید برق

عزت‌اله مظفري^۱، محمدحسين مظفري^۲، رجب اسفندياري^۳

۱- استادیار رشته فراوری مواد معدنی دانشگاه بین المللی امام خمینی، قزوین (ره) e.mozaffari@eng.ikiu.ac.ir
۲- دانشجوی کارشناسی رشته مترجمی زبان انگلیسی دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره) gmail.com@mozaffari۹۵
۳- استادیار رشته مترجمی زبان انگلیسی دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره) esfandiari.ra@gmail.com

چکیده

امروزه مصرف بی‌روبه رشد انرژی از یک طرف و دغدغه‌های حفظ منابع طبیعی از طرف دیگر جامعه بشری را به شناسایی و بهره‌برداری از منابع جدید انرژی واداشته است. استفاده مستمر از انواع منابع انرژی سوخته‌های فسیلی این منابع را در معرض نابودی قرار داده و آلودگی ناشی از مصرف این منابع نیز تهدیدی برای محیط زیست می‌باشد. یکی از منابع جدید انرژی تولید انرژی از زیست توده است، که در این میان لجن تصفیه‌خانه فاضلاب شهری و صنعتی حجم قابل توجهی را تشکیل می‌دهد. در این مقاله ضمن معرفی لجن تصفیه خانه‌های فاضلاب به‌عنوان سوخت مناسب نیروگاهی، ارزش حرارتی لجن مرطوب و خشک مورد مقایسه قرار گرفته است. قیمت برق تولیدی از لجن در مقایسه با سایر فناوریهای تولید برق از منابع زیست توده نیز مورد بررسی قرار گرفته است. ظرفیت‌های تولید برق از لجن نیز در ایران برآورد شده و اهمیت آن در مقابل سایر ظرفیت‌های برآورد شده تولید برق برای انواع نیروگاههای زیست توده در ۳۰ شهر مورد ارزیابی قرار داده شده است. بکارگیری سیستم بازیافت حرارت به‌منظور جلوگیری از هدررفت انرژی حرارتی و کسب راندمان الکتریکی بالاتر، نظیر تمهیدات اصلاح و تعدیل سیستم و اضافه کردن بخش‌های پیش‌گرم، همراه با بستر شناور به عنوان روش مناسب سوزاندن لجن می‌تواند راه حل مناسبی باشد. ارائه نمونه‌های موفق تولید برق از لجن در سایر کشورها به همراه فناوری‌های بکارگرفته شده می‌تواند نتیجه‌گیری نسبتاً مفیدی را در این مقاله به خواننده بدهد.

کلیدواژگان: سوخت نیروگاه، بستر شناور، لجن فاضلاب، فلزات سنگین



۱- مقدمه

امروزه حفظ منابع طبیعی به یکی از مهمترین دغدغه‌های بشر تبدیل گردیده است. در این راستا، مصرف روبه رشد انرژی یکی از چالش‌های مهم روبروی بشر است. چراکه، از یک سو مصرف بی‌رویه انواع منابع انرژی رایج حاصل از سوخت‌های فسیلی این ذخیره خدادادی را در معرض نابودی قرار داده و از سوی دیگر آلودگی ناشی از مصرف این منابع تهدیدی برای محیط زیست می‌باشد.

لذا، بشر با نگاهی جدید به محیط اطراف خود در پی منابع جدید انرژی است، تا با بر طرف نمودن نیاز خود در حفظ محیط زیست نیز کوشا باشد. یکی از منابع جدید انرژی، تولید انرژی از پسماند می‌باشد. این روش تولید انرژی از دو جنبه حائز اهمیت است: اول، با استحصال انرژی از پسماند بخشی از انرژی مورد نیاز بشر تامین می‌شود و دوم، مشکلات بهداشتی و زیست محیطی ناشی از مدیریت نادرست پسماند کاهش می‌یابد. همچنین، به حفظ منابع طبیعی کمک می‌شود.

لجن تصفیه‌خانه‌های فاضلاب نوعی زیست توده است که از اجزا قابل تجزیه زیستی تشکیل شده است. این ماده یکی از منابع عمده در میان انواع منابع انرژی‌های نو می‌باشد. تاریخچه زیست توده در ایران برمی‌گردد به استفاده‌های سنتی از این منبع بطوریکه مطابق سرشماری سال ۱۳۷۵ ده درصد خانوارهای روستایی برای گرمایش منازل خود و پنج درصد خانوارهای روستایی برای پخت‌وپز عمدتاً از چوب و فضولات دامی استفاده می‌کرده‌اند. سالانه میلیون‌ها تن لجن در فرآیند تصفیه فاضلاب در تصفیه خانه های شهرها و صنایع مختلف تولید می‌گردد که دارای ظرفیت مناسبی برای تولید انرژی می‌باشد [۱]. این در حالی است که دفن این لجن‌ها از معضلات اساسی تصفیه خانه‌ها بوده و هزینه‌های گزافی در این زمینه صرف می‌گردد. با بهره‌گیری از فناوری‌های مناسب میتوان ضمن حل معضل این پسماندهای آلی به تولید انرژی پاک نیز اقدام نمود. در حال حاضر پروژه های متعددی در این خصوص توسط وزارت نیرو و بخش خصوصی در دست اجرا می‌باشد [۲].

مشکلات زیست محیطی ناشی از دفن پسماندها موجب شده است تا محققین روش‌های مناسب استحصال انرژی از لجن را مورد توجه قرار دهند. از آنجمله می‌توان به روش سوزاندن لجن و اخذ انرژی از آن اشاره کرد. کاربردهای انرژی زیست توده در تولید فرآورده‌های انرژی‌زا علاوه بر انرژی گرمایی و جنبشی شناخته شده است، لکن در این مقاله تلاش شده تا روش‌های استحصال انرژی از لجن فاضلاب‌ها مورد بررسی قرار گرفته و با توجه به شرایط و ظرفیت‌های موجود در کشور ارزیابی فنی اقتصادی و زیست‌محیطی گردد.

۲- معرفی لجن تصفیه خانه‌ها به عنوان سوخت نیروگاهها

لجن حاصل از تصفیه فاضلاب حاوی مقدار قابل توجهی ماده آلی است که باعث افزایش ارزش حرارتی آن شده است. سالانه میلیون‌ها تن لجن در فرآیند تصفیه فاضلاب در تصفیه‌خانه‌های شهرها و صنایع مختلف تولید می‌گردد که دارای ظرفیت مناسبی برای تولید انرژی می‌باشد. در حالیکه، دفن این لجن‌ها از معضلات اساسی تصفیه خانه‌ها بوده و هزینه‌های گزافی در این زمینه صرف می‌گردد. گرایش به بازیابی انرژی از لجن تصفیه‌خانه‌های فاضلاب به دلیل ضررهایی که روش دفع سنتی این پسماند بوجود می‌آورد در حال گسترش است [۲]. روش دفن لجن^۱ موجب خارج شدن شیرابه و مواد سمی و

1. waste-to-energy
2. landfill

فلزات سنگین به آبهای زیرزمینی یا هوای اطراف می‌شود. با بهره‌گیری از فناوری‌های مناسب میتوان ضمن حل معضل این پسماندهای آلی به تولید انرژی پاک نیز اقدام نمود.

نکته قابل توجه این است که گفته می‌شود این آلاینده‌های سمی موجود در لجن به هنگام سوزاندن لجن به صورت ترکیبات غیرفعال درآمده و بدینوسیله در خاکستر پسماند مهار می‌شوند [۳]. این در حالی است که اگر لجن دفن شود عناصر و فلزات سنگین وارد آب‌های زیرزمین شده و محیط زیست را آلوده خواهند کرد.

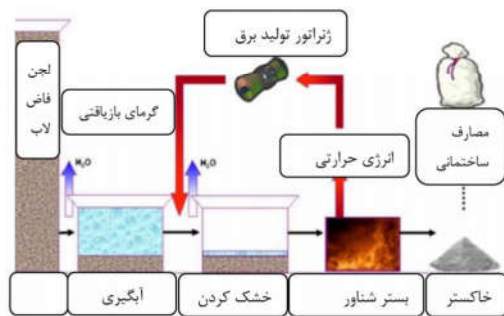
بعلاوه، استفاده از لجن در کشاورزی به‌عنوان کود مشکلاتی را بیار می‌آورد. روندی که برای دفع فاضلاب‌ها مطرح شده کاربرد آنها در اراضی کشاورزی است. اما، گرچه در سال‌های اخیر بازیافت لجن فاضلاب و استفاده از آن به‌عنوان کود در اراضی کشاورزی به دلیل ارزان بودن مورد توجه بوده است، این کاربرد خالی از مسایل زیست محیطی نیست. نتیجه تحقیقات برخی محققین نتایج نشان داد که لجن فاضلاب به صورت باقیمانده و تجمع، غلظت سرب و کادمیم را در خاک افزایش میدهد. بنابراین، از آن به‌عنوان بهترین تدبیر در امر کشاورزی نمی‌توان یاد کرد [۴].

۳- ظرفیت‌های تولید برق از لجن در ایران

میزان لجن تولیدی از فاضلاب‌های شهری و صنعتی در ایران حدود ۶۰ گرم در روز به ازای هر نفر تخمین زده شده است [۵]. این رقم با احتساب جمعیت ۷۵ میلیون نفری ایران معادل ۴۵۰۰ تن در روز می‌باشد. استحصال برق از لجن به‌عنوان یکی از منابع جدید انرژی شناخته شده است [۵].



شکل ۱ ظرفیت‌های تولید برق از منابع مختلف زیست توده [۲]



شکل ۲- نمای عمومی فرایند تولید برق از لجن

۴- فرایند تولید برق از لجن

مراحل تولید برق از لجن فاضلاب، همانطوریکه در شکل ۲ دیده می‌شود، بطور کلی شامل خشک کردن، سوزاندن و فرایند تبدیل انرژی حرارتی به الکتریکی است. بطوریکه ملاحظه می‌شود مهم‌ترین و پرهزینه‌ترین مراحل خشک کردن و سوزاندن لجن است. سوزاندن لجن روشی کارآمد برای بازیابی انرژی به احتساب می‌آید.

تقریباً تمام نیروی برق دنیا (حدود ۱۰ میلیارد وات) توسط موتورهای گرمایی تولید می‌شوند؛ این موتورها توربین‌های بسیار بزرگ گاز یا بخار هستند که می‌توانند گرما را به انرژی مکانیکی و سپس به الکتریسیته تبدیل کنند. با این حال بسیاری از این گرما به الکتریسیته تبدیل نشده و به صورت حرارت در محیط اطراف منتشر می‌شود. نیروگاه‌های توربین بخار قدیمی هوای تازه را از طریق فن‌ها از محیط اطراف گرفته و و بداخل سیستم منتقل می‌کنند. اما، هوای مورد نیاز احتراق را می‌توان از طریق گازهای گرم خروجی توربین‌های گازی که در کنار توربین‌های تولید بخار نصب شده‌اند تامین کرد. از جمله نیروگاه‌های توربین بخار مدرن نیروگاه‌هایی بنام سیکل ترکیبی‌اند، که در آنها ژنراتور توربین گازی برق را تولید می‌کند. درعین حال، انرژی حرارتی تلف شده از توربین گازی (توسط محصولات احتراق) برای تولید بخار مورد نیاز توربین بخار مورد استفاده قرار می‌گیرد. بازده الکتریکی از یک چرخه ساده کارخانه نیروگاه برق بدون استفاده از اتلاف گرما به طور معمول بین ۲۵ تا ۴۰ درصد است. در حالی‌که، راندمان الکتریکی سیکل ترکیبی حدود ۶۰ درصد است. از نکات قابل توجه تغییرات مهمی است که باید در سیستم معمولی داده شود. مثلاً، گازهای خروجی از توربین گازی بسیار گرم‌اند (حدود ۵۵۰ درجه سانتیگراد) و نیاز به تمهیدات کانالی انتقال هوا بین توربین گازی و سیستم احتراق است [۷].

با بکارگیری سیستم بازیافت حرارت (که در غیر این صورت به هدر می‌رود)، همانطوریکه در شکل ۲ نشان داده شده است می‌توان راندمان الکتریکی بالاتری بدست آورد.

در صنعت سیمان نیز می‌توان با جلوگیری از خروج انرژی از کوره‌ها و با اصلاح و تعدیل وسایل در جهت بازیافت گرما مقدار محسوسی انرژی را در فرایند تولید صرفه‌جویی کرد. این تمهیدات می‌تواند با اضافه کردن بخش‌های پیش‌گرم و یا خنک‌کننده در تولید سیمان باشد.

همچنین، استفاده از لجن جایگزین سوخت ذغالی در تولید سیمان می‌تواند مصرف انرژی را در این صنعت کاهش داد. مثال بارز آن کارخانه‌ای^۱ در ونیز است که در آن لجن را پس از آگیری و خشک کردن به صورت گندله به عنوان سوخت کوره سیمان مصرف می‌کنند [۸].

۵- ارزش حرارتی لجن

لجن حاوی مقدار زیادی مواد آلی است که موجب بالا رفتن ارزش حرارتی آن می‌شود. جدول ۱ ارزش حرارتی لجن مرطوب و خشک را در مقایسه با تعدادی از منابع سوختی نشان می‌دهد [۹].

جدول ۱ ارزش حرارتی لجن مرطوب و خشک را در مقایسه با تعدادی از منابع سوختی [۹]

منابع سوختی [۹]	سوخت
ارزش حرارتی (کیلو ژول بر کیلوگرم)	
۱۴۶۰۰ الی ۲۶۷۰۰	ذغال
۱۷۶۰۰ الی ۲۰۰۰۰	پلاستیک، چوب، الیاف و پسماندها
۱۶۰۰۰ الی ۲۰۰۰۰	چوب
۱۲۰۰۰ الی ۲۰۰۰۰	لجن خشک
۱۰۰۰ الی ۳۰۰۰	لجن مرطوب

اما، لجن حاوی مقدار قابل توجهی رطوبت است. بنابراین، نخست باید خشک و سپس سوزانده شود. انرژی لازم برای خشک کردن لجن (Q_{drying}) برحسب KJ/Kg از رابطه زیر قابل محاسبه است [۹]:

$$Q_{\text{drying}} = M_{\text{ws}} \times W [(C_{\text{p,water}} \times \Delta T) + \Delta H_{\text{wap}} + [M_{\text{ws}} \times (1 - W)] \times C_{\text{p,sludge}} \times \Delta T$$

در این معادله W رطوبت لجن، M_{ws} وزن نمونه لجن C_{p,water} و C_{p,sludge} بترتیب ظرفیت گرمایی ویژه آب و لجن می‌باشند. ΔT اختلاف

1. Enertech's Rialto Plant



دمای لجن در فضای آزاد و در محیط خشک کردن، و ΔH_{vap} مقدار انرژی مورد نیاز برای تبخیر یک کیلوگرم آب برابر 2090 KJ/Kg است.

نتایج آزمایش‌ها روی لجن‌های نمونه برداری شده از دو تصفیه‌خانه تهران پس از انجام محاسبات بر روش فوق نشان داد که از هر کیلوگرم لجن آبیگری شده حدود 1856 کیلوژول انرژی گرمایی بدست خواهد آمد [۹]. در این محاسبات میزان درصد جامد خشک لجن آبیگری شده برابر 30 درصد بوده است.

۶- قیمت برق تولیدی از لجن در مقایسه با سایر فناوریهای تولید برق از منابع زیست توده

در حالیکه منابع انرژی‌های تجدیدپذیر بصورت فراوان و رایگان در اختیار بشر است هزینه تجهیزات و مواد لازم جهت جمع‌آوری، فراوری و انتقال آن قابل توجه است. در حال حاضر قیمت تمام شده تولید برق از منابع انرژی‌های تجدیدپذیر بالاتر از هزینه‌های مربوط به تولید برق با سوخت‌های فسیلی است. جدول ۲ مقایسه هزینه‌های برق از انواع منابع انرژی‌های تجدیدپذیر را نشان می‌دهد. در محاسبه این هزینه‌ها کلیه هزینه‌های سرمایه‌گذاری و جاری و استهلاک و نیز زمان لازم برای ساخت و راه‌اندازی نیروگاه در نظر گرفته شده است. ضمناً، این هزینه‌ها بدون احتساب کمک‌های یارانه‌ای دولت‌ها برآورد شده است. همانطوریکه ملاحظه می‌شود در حال حاضر اقتصادی‌ترین آنها نیروگاه‌های گازسوز و ذغال‌سوز و نیروگاه‌های زمین‌گرمایی است. اما، با احتساب هزینه‌های فزاینده بالاسری برای سوخت‌های فسیلی از سوی دولت‌ها، پیش‌بینی می‌شود این گزینه‌ها در آینده نه چندان دور گران‌ترین و کم‌صرف‌ترین گزینه‌ها خواهند بود [۱۰، ۱۱].

جدول ۲ برآورد مقایسه‌ای هزینه برق از انواع منابع انرژی‌های تجدیدپذیر [۱۱]

نوع نیروگاه	هزینه (دلار / کیلووات / ساعت)
ذغال	۰/۱۴ الی ۰/۱
گاز	۰/۰۷ الی ۰/۱۳
هستهای	۰/۱
باد	۰/۰۸ الی ۰/۲
خورشیدی	۰/۱۳
زمین‌گرمایی	۰/۰۵
زیست توده	۰/۱

هزینه سرمایه‌گذاری و هزینه‌های تراز شده نیروگاههای زیست توده در تکنولوژی‌های مختلف نشان می‌دهد که چنانچه لجن فاضلاب با استفاده از شیوه بستر شناوری سوزانده شود هزینه‌های مربوطه در مقایسه با سایر روشهای این گروه در حد متوسط خواهد بود. چنانچه این رقم را معادل 0.1 (دلار / کیلووات / ساعت) در نظر بگیریم، فناوریهای تولید برق حاصل از زیاله سوزها و چوب سوزها رقمی بالغ بر 0.12 (دلار / کیلووات / ساعت) و فناوریهای بیوشیمیایی که در آنها گاز متان و محصولات جنبی با ارزش حرارتی متوسط (بیوگاز) تولید میشود رقم حدود 0.08 (دلار / کیلووات / ساعت) را به خود اختصاص خواهند داد [۲، ۱۰، ۱۱].

۷- نتیجه‌گیری

در حالیکه مسئله بازدارنده در روش تولید برق از لجن فاضلاب هزینه‌های آبیگری و خشک کردن لجن است باید توجه داشت که آلودگی‌های زیست محیطی ناشی از دفن لجن قابل تعمق است. استفاده بی‌رویه لجن به عنوان جایگزین کود شیمیایی موجب نگرانی‌هایی شده است. استفاده از لجن فاضلاب به عنوان کود آلی در خاک به ویژه خاک‌های اسیدی، ممکن است باعث افزایش قابلیت جذب فلزات سنگین حتی تا حد سمیت گردد [۴، ۱۲]. اما گزارش شده است که با احتراق لجن این فلزات سنگین در خاکستر پسماند جمع شده و مهار می‌شوند [۳]. بنابراین، پیش‌بینی می‌شود استفاده از لجن فاضلاب در تولید برق در آتی نزدیک بیشتر مورد توجه جامعه جهانی و نیز ایران قرار گیرد.

۸- تقدیر و تشکر

بدینوسیله از دانشگاه بین‌المللی امام خمینی قزوین^(۶) بخاطر حمایت‌های آموزشی و تحقیقاتی که در انجام این تحقیق نموده‌اند تشکر می‌شود.

۹- مراجع

- [1] دائرةالمعارف فارسی ویکی، دسترسی ۱۲ مهر ۱۳۹۳ <http://fa.wikipedia.org/wiki>
- [2] سازمان انرژیهای نو ایران، دسترسی ۱۵ مهر ۱۳۹۳ <http://www.suna.org.ir/fa/biomas/history>
- [3] K. Pavel, Z. Kadlek, *Sewage sludge as a biomass energy source*, Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis, 1, 2013.
- [4] عباسی زاده، ا.، آفیونی، م.، رضایی نژاد، ی.، آلودگی سرب و کادمیم ناشی از مصرف لجن فاضلاب در خاک، مجموعه مقالات دومین همایش تخصصی مهندسی محیط زیست، دانشگاه تهران، تهران، ۱۳۸۷.
- [5] تاروردی زاده، ا.، بهینه‌سازی آبیگری لجن در بسترهای خشک‌کننده فاضلاب شهری، دانشگاه تهران، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، ۱۳۸۸.
- [6] Y. Kim and W. Parker, A Technical and Economic Evaluation of the Pyrolysis of Sewage Sludge for Production of Bio-Oil, *Bioresource Technology*, Vol. 99, No. 5, pp. 1409-1416, 2008.
- [7] R. Kehlhofer, F. Hannemann, F. Stirnimann and B. Rukes, *Combined-Cycle Gas & Steam Turbine Power Plants*, Ch6: applications of combined cycles, 2009.
- [8] *Businesses struggle to profit from sewage sludge*, Accessed 20 October 2014; <http://grist.org/article/2009-05-06-sludge-energy-business>.
- [9] محزون، ی. و ترابیان، ع.، بررسی و محاسبه ارزش حرارتی لجن تصفیه‌خانه فاضلاب تهران، مجموعه مقالات سومین کنفرانس ملی سوخت، انرژی و محیط زیست، پژوهشگاه مواد و انرژی، تهران، ایران، شهریور ماه ۱۳۹۲.
- [10] P. Scheckel, *Homeowner's Energy Handbook: Your Guide to Getting Off the Grid*, Storey Publishing, 2013.
- [11] *US DOE Annual Energy Outlook*, Accessed 20 October 2014; http://www.eia.gov/forecasts/aeo/pdf/electricity_generation.pdf.
- [12] وانقی، س.، آفیونی، م.، شریعتمداری، ح.، میلی، م.، اثر لجن فاضلاب و pH خاک بر قابلیت جذب عناصر کم مصرف و فلزات سنگین، علوم آب و خاک (علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی)، ۷، ۳، ۱۳۸۲.