مقایسه کارایی امواج مایکروویو با کوره‌های متداول الکتریکی در کاهش حجم و تثبیت نهایی لجن‌های خام اولیه و ثانویه تولیدی در تصفیه‌خانه فاضلاب جنوب اصفهان*

افشین ابراهیمی[1]، حسین موحدیان عطار[2]

چکیده

مقدمه: جامدات بیولوژیکی تولیدی حین عملیات تصفیه فاضلاب‌ها، لجن نامیده می‌شوند. در واقع بخش اعظم آلاینده‌هایی که مسؤول ماهیت بد، نفرت‌انگیز و زیان‌آور در فاضلاب هستند، در لجن تغلیظ شدند که حاوی انواع میکروارگانیسم‌های بیماری‌زا، مواد آلی و معدنی می‌باشند و می‌توانند برای انسان و محیط زیست مضر و خطرناک باشند. بنابراین قبل از این که در محیط رها شوند، باید کاملاً تصفیه و پردازش شوند و با توجه به مقررات زیست محیطی دفع گردند. یکی از روش‌هایی که برای تصفیه لجن مورد استفاده قرار می‌گیرد، تصفیه حرارتی است. در این میان به نظر می‌رسد که امواج مایکروویو به عنوان یکی از این روش‌ها می‌تواند نقش مهمی در تصفیه حرارتی داشته باشد.

روش‌ها: در این مطالعه، کارایی امواج مذکور جهت کاهش حجم و تثبیت نهایی لجن‌های اولیه و ثانویه حاصل از تصفیه‌خانه فاضلاب جنوب اصفهان در مقایسه با کوره متداول الکتریکی آزمایشگاهی مورد بررسی علمی قرار گرفت. در این مطالعه، آزمایش‌ها به روش ناپیوسته و با استفاده از نمونه‌های لجن اولیه و ثانویه حاصل از تصفیه‌خانه فاضلاب جنوب اصفهان و طی دو مرحله (به تنهایی و با افزودن ماده جاذب) انجام شد و تأثیر متغیرهایی مانند مدت زمان اشعه‌دهی در فاصله ۱ تا ۱۰ دقیقه برای اجاق مایکروویو، ۲۴۰ و ۳۰۰ دقیقه برای حرارت‌دهی کوره الکتریکی، تأثیر میزان ماده جاذب بین ۵ تا ۳۰ درصد وزنی بر مقدار دمای ایجاد شده در توده لجن، درصد کاهش وزن، درصد کاهش جامدات کل و فرار، کاهش باکتری‌های کلیفرم و شمارش بشقابی باکتری‌های هتروتروفیک آزمایش گردید.

یافته‌ها: با افزایش زمان اشعه‌دهی، کارایی اجاق مایکروویو در کاهش وزن لجن و حذف درصد رطوبت محتوی نمونه‌ها افزایش یافت و در نمونه‌هایی که درصدهای مختلفی ماده جاذب اشعه (مانند زغال چوب) به آن‌ها افزوده شده بود، دمای توده نمونه‌ها تا حدود ۶۰۰ درجه سانتیگراد افزایش یافت، در حالی که در دمای نمونه‌های مشابه مورد عمل در کوره الکتریکی، افزایش دمایی قابل توجهی مشاهده نگردید. همچنین در نمونه‌های بدون ماده جاذب، اجاق مایکروویو قادر به کاهش تا ۴/۵ و log ۵ به ترتیب برای باکتری‌های کلیفرم و شمارش بشقابی هتروتروفیک بود. در نمونه‌های حاوی ماده جاذب، تا ۱۰۰ درصد این میکروارگانیسم‌ها حذف گردیدند.

نتیجه‌گیری: اطلاعات حاصل از این تحقیق در مجموع مشخص می‌سازند که در صورتی که نمونه‌های لجن به تنهایی تحت اشعه مایکروویو در زمان‌های مختلف قرار گیرند، فقط خشک می‌گردند و رطوبت خود را از دست می‌دهند؛ اما اگر به آن‌ها درصدهایی از مواد جاذب اشعه مانند زغال چوب افزوده شود، علاوه بر خشک شدن، به دلیل افزایش بیش از حد دما در توده نمونه‌ها، احتمال رخ دادن فرایند پیرولیز در آن‌ها وجود دارد و نمونه‌های لجن ضمن هضم شدن، تثبیت می‌گردند.

واژه‌های کلیدی: امواج مایکروویو، لجن فاضلاب، تصفیه حرارتی.

نوع مقاله: *تحقیقی*

دریافت مقاله: ۸۹/۳/۲۷ *پذیرش مقاله: ۸۹/۴/۳*

* این مقاله حاصل طرح پژوهشی مصوب دانشگاه علوم پزشکی اصفهان به شماره ۲۸۵۰۲۶ می‌باشد.

۱- استادیار، مرکز تحقیقات محیط زیست، دانشگاه علوم پزشکی اصفهان، اصفهان، ایران (نویسنده مسؤول)

Email: a_ebrahimi@hlth.mui.ac.ir

۲- استاد، مرکز تحقیقات محیط زیست، دانشگاه علوم پزشکی اصفهان، اصفهان، ایران.

[Downloaded from hsr.mui.ac.ir on 2026-11-07]

www.mui.ac.ir

مقدمه

در حال حاضر، بیشتر تصفیه‌خانه‌های فاضلاب شهری در سرتاسر دنیا، روزانه بیش از هزاران بیلیون گالن فاضلاب خانگی یا سایر انواع فاضلاب‌ها را تصفیه می‌نمایند (۱). از میان اجزا جدا شده از فاضلاب، لجن بیشترین حجم را به خود اختصاص می‌دهد (۲، ۱). در ایالات متحده، مقدار سالیانه لجن فاضلاب تولید شده در طول عملیات تصفیه فاضلاب‌های خانگی، حدود ۴۷ پوند برای هر نفر برآورد شده است. منابع اصلی تولید لجن در تصفیه‌خانه‌ها، عموماً حوضچه‌های ته‌نشینی هستند، اما واحدهای تغلیظ، تثبیت و آماده‌سازی لجن نیز در شمار این منابع قرار می‌گیرند (۳). ترکیباتی که در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب حذف می‌گردند شامل آشغال، دانه، کف، ذرات جامد و جامدات بیولوژیکی می‌باشند. این ذرات جامد معمولاً به حالت مایع یا نیمه جامد می‌باشد و بسته به نوع واحد عملیاتی و فرایندی به کار گرفته شده در حذف آن‌ها، حاوی مقادیری از ۰/۲۵ تا ۱۲ درصد وزنی جامد هستند (۲). لجن تولید شده به علت داشتن مقادیر قابل توجهی مواد آلی، قابل گندیدگی است. همچنین حاوی مقادیری از مواد غیر آلی است که به شدت آلوده می‌باشند. بنابراین باید به نحوی از محیط تصفیه‌خانه جمع آوری شوند و پس از تصفیه دفع گردند (۴). هزینه‌های اولیه جمع آوری و تصفیه لجن حدود ۴۰-۳۰ درصد کل هزینه‌های تصفیه فاضلاب را تشکیل می‌دهند و این اعمال را باید از پر دردسرترین مسایل تصفیه فاضلاب دانست. بهره‌برداری از تأسیسات تصفیه و دفع لجن نیز رقم قابل ملاحظه‌ای از کل هزینه‌های بهره‌برداری تصفیه‌خانه‌های فاضلاب می‌باشد. بنابراین باید توجه خاصی به تصفیه و تثبیت لجن معطوف گردد (۴).

طبق مقررات سازمان حفاظت محیط زیست آمریکا لجن باید طوری تصفیه شود که با یکی از استانداردهای موجود انطباق یابد. در حال حاضر روش‌های مختلفی وجود دارند که به کمک آن‌ها می‌توان لجن را به سطح استانداردهای کلاس A یا B رسانید. این روش‌ها عبارت از پمپاژ لجن، انجام عملیات مقدماتی مانند خرد کردن، آشغال‌گیری، دانه‌گیری، اختلاط و ذخیره لجن می‌باشند. همچنین روش‌هایی مانند انواع تغلیظ، تثبیت، آماده‌سازی، آبگیری، خشک کردن حرارتی، سوزاندن، استفاده از جامدات بیولوژیکی در زمین و انتقال و ذخیره‌سازی لجن را نیز شامل می‌شوند. بیشتر این روش‌ها سبب کاهش حجم و وزن جامدات می‌شوند. در بین این روش‌ها، خشک کردن حرارتی و سوزاندن به طرق مختلف از جمله روش‌هایی هستند که برای تصفیه جامدات بیولوژیکی از آن‌ها استفاده می‌شوند. این روش‌ها می‌توانند پاتوژن‌ها را به میزان بیشتری کاهش دهند و در نتیجه لجن‌های تصفیه شده را به سطح استانداردهای کلاس A برسانند (۲).

یکی از روش‌های تصفیه حرارتی که کاربرد آن از زمان جنگ جهانی دوم و به منظور گرم کردن و حرارت‌دهی آغاز گردید، کاربرد امواج مایکروویو در خشک کردن سریع لجن می‌باشد (۵). با توجه به این که این فن‌آوری می‌تواند با سرعتی بسیار سریع‌تر از روش‌های متداول حرارتی، عمل خشک کردن لجن را انجام دهد؛ همچنین در طی شرایط خاصی نیز امکان انجام پیرولیز حرارتی این جامدات را فراهم می‌آورد (۶)، به نظر می‌رسد که استفاده از این فن‌آوری در تصفیه حرارتی جامدات بیولوژیکی علاوه بر مقرون به صرفه بودن، در نهایت محصولاتی تولید می‌نماید که مطابق با استانداردهای کلاس A باشند. بنابراین در این تحقیق کارایی امواج مایکروویو در تصفیه حرارتی جامدات بیولوژیکی با کارایی کوره الکتریکی آزمایشگاهی مقایسه گردید.

روش تصفیه حرارتی که در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفت، باعث انعقاد جامدات شد، ساختمان‌های ژلاتینی را شکست و میل ترکیبی مواد جامد لجن با آب را کاهش داد. در نتیجه لجن تقریباً استریل و به سادگی آبگیری شد. خشک کردن حرارتی مستلزم کاربرد حرارت جهت تبخیر آب و کاهش رطوبت موجود در جامدات بیولوژیکی تا زیر حد قابل حصول به وسیله روش‌های متعارف آبگیری می‌باشد. مزایای خشک کردن حرارتی شامل کاهش هزینه‌های حمل و نقل

[Downloaded from hsr.mui.ac.ir on 2026-11-07]

www.mui.ac.ir

محصول تولیدی، کاهش بیشتر پاتوژن‌ها، بهبود قابلیت نگهداری و قابلیت فروش در بازار می‌باشند (۲). امروزه کاربردهای اصلی اشعه مایکروویو شامل فرآوری مواد غذایی، خشک کردن چوب، پالایش پلاستیک و لاستیک‌ها همراه با بهبود و پیش گرمایش سرامیک‌ها می‌باشند. معمولاً گفته می‌شود که پرتوهای مایکروویو، اصطلاحی مرتبط با هر نوع پرتو الکترومغناطیسی در دامنه فرکانسی مایکروویو از ۳۰۰ مگاهرتز تا ۳۰۰ گیگاهرتز می‌باشند (۵). عموماً اجاق‌های مایکروویو خانگی و صنعتی در فرکانس ۲/۴۵ گیگاهرتز مربوط به طول موج ۱۲/۲ سانتی‌متر و انرژی ev $^{-5}$۱۰×۱/۰۲ عمل می‌کنند. مواد می‌توانند از نظر سرعت گرم شدن در مایکروویو به سه گروه شامل مواد هدایت کننده، مواد عایق و مواد جاذب دسته‌بندی شوند. یکی از مشخصات مهم گرم کردن مایکروویو، پدیده تشکیل نقاط داغ می‌باشد که به وسیله آن نواحی با دماهای خیلی زیاد به دلیل گرمادهی غیر یکنواخت تشکیل می‌شوند. تشکیل امواج ایستاده در محفظه مایکروویو سبب می‌شود که برخی نواحی در معرض انرژی بیشتری نسبت به نواحی دیگر قرار گیرند. این مسأله سبب می‌شود که در این مناطق دارای انرژی بیشتر، به دلیل وابستگی غیر خطی، میزان گرم شدن افزایش یابد. انرژی مایکروویو در گرم کردن انتخابی مواد بی‌نهایت مؤثر می‌باشد، به طوری که هیچ مقدار انرژی در «حرارت‌دهی توده» نمونه هدر نمی‌رود. این مزیت آشکاری است که گرم کردن با مایکروویو در مقایسه با روش‌های متعارف دارد (گرم کردن در اجاق‌ها یا کوره‌ها) (۵). در مقایسه با فن‌آوری‌های گرم کردن متعارف، گرم کردن با مایکروویو دارای مزایایی همچون میزان حرارت‌دهی بالاتر، عدم تماس مستقیم بین منبع حرارت‌دهی و مواد گرم شده، امکان حرارت‌دهی انتخابی مواد، کنترل بیشتر فرایند حرارت‌دهی و خشک کردن و کاهش اندازه تجهیزات و میزان دفع مواد می‌باشد(۵).

Menendez و همکاران نشان دادند در صورتی که فقط لجن خام آبدار در مایکروویو تصفیه شود، فقط عمل خشک کردن آن‌ها صورت می‌گیرد، اما اگر لجن با مقدار کمی مواد مناسب جاذب اشعه مایکروویو مخلوط شود، درجه حرارت‌هایی تا ^{o}C ۹۰۰ نیز می‌تواند حاصل شود، به طوری که علاوه بر خشک شدن لجن، پیرولیز هم انجام می‌شود. همچنین نتایج مقایسه روش تصفیه مایکروویو با تصفیه در کوره الکتریکی متداول و مشخصات پسماندهای جامد کربنی به دست آمده از این دو روش نیز نشان دادند که با کمک انرژی مایکروویو نسبت به سایر روش‌های حرارت‌دهی متعارف، مقادیر قابل توجهی انرژی و زمان برای درجه مشابهی از خشک شدن یا پیرولیز صرفه‌جویی می شود و احتمال دستیابی به کاهش حجم بیشتر از ۸۰ درصد امکان پذیر بوده و در نتیجه پسماند کربنی متخلخلی تولید می‌شود که ماهیت بازی داشته و منبعی از گازها و مایعات سوختی را فراهم می‌کند (۶).

Collins و همکاران در مطالعه‌ای با عنوان «کاربرد روش حرارتی مایکروویو برای آبگیری و خشک کردن لجن» در مقیاس آزمایشگاهی نشان دادند که هزینه‌های آبگیری لجن‌هایی که دارای ۵، ۱۰و ۳۰ درصد جامدات هستند، به مقدار زیادی بالاست، اما هزینه متوسط انرژی به ازای هر تن جامدات خشک لجن مورد نیاز برای خشک کردن لجن‌هایی که در ابتدا دارای ۲۰، ۳۰و۴۰ تا ۸۰ درصد جامدات هستند، به ترتیب ۳۱۰، ۱۷۷و ۱۱۱ دلار می‌باشند. این هزینه‌ها و به ویژه اگر برخی از سایر مزایای خشک کردن با مایکروویو مانند کوچکتر بودن اندازه راکتور، پاک بودن منبع انرژی، امکان بازیافت حرارت و حذف مرحله پیش تصفیه لجن نیز مد نظر قرار گیرند، با هزینه‌های برخی از روش‌های سنتی خشک کردن لجن به طور مناسبی قابل مقایسه هستند (۷).

مطالعه Liao و همکاران با عنوان «آزادسازی فسفر از لجن فاضلاب با استفاده از فن‌آوری مایکروویو» نیز مشخص کرد که تصفیه لجن فاضلاب با استفاده از مایکروویو، فرایند سریع و مؤثری در آزادسازی فسفر از لجن فاضلاب است. با کمک تصفیه با امواج مایکروویو در مدت فقط ۵ دقیقه، تا ۷۶ درصد فسفر موجود در لجن می‌تواند به صورت محلول آزاد شود. در این فرایند به هیچ نوع ماده شیمیایی اضافی نیاز

[Downloaded from hsr.mui.ac.ir on 2026-11-07]
www.mui.ac.ir

نمی‌باشد و فرایند مایکروویو می‌تواند به جای بهبود و تثبیت لجن مایع مورد استفاده قرار گیرد (۸).

مطالعه Wang و همکاران با عنوان «پیش تصفیه حرارتی لجن فاضلاب با استفاده از مایکروویو» نیز مشخص نمود که در هنگام اشعه‌دهی لجن‌های فاضلاب، ساختارهای کلوئیدی آن‌ها تخریب می‌شوند و ترکیبات آلی محلول را آزاد می‌نمایند. در نتیجه کارایی آبگیری و ته‌نشینی آن‌ها بهبود و محتوای جامدات کل و معلق آن‌ها کاهش می‌یابد. ایجاد دماهای بالا سبب افزایش نسبت انحلال جامدات معلق می‌شود. در نمونه لجن حاوی ۲ درصد جامدات کل در دمای ۱۹۰ درجه سانتیگراد، حدود ۴۰ درصد از جامدات معلق به حالت محلول در می‌آیند (۹).

چون بخش اعظم آلاینده‌هایی که مسؤول ماهیت بد، نفرت انگیز و زیان‌آور در فاضلاب هستند، در لجن تغلیظ شده و حاوی انواع میکروارگانیسم‌های بیماری‌زا، مواد آلی و معدنی وجود دارند و می‌توانند برای انسان و محیط زیست مضر و خطرناک باشند. بنابراین قبل از این که در محیط رها شوند، باید کاملاً تصفیه و پردازش شوند و با توجه به مقررات زیست محیطی دفع گردند. از طرفی چون به نظر می‌رسد که امواج مایکروویو به عنوان یکی از روش‌های تصفیه حرارتی بتواند نقش مهمی در تصفیه لجن داشته باشد؛ بنابراین در این مطالعه، کارایی امواج مذکور جهت کاهش حجم و تثبیت نهایی لجن‌های اولیه و ثانویه حاصل از تصفیه‌خانه فاضلاب جنوب اصفهان در مقایسه با کوره متداول الکتریکی آزمایشگاهی مورد بررسی علمی قرار گرفت.

روش‌ها

در این پژوهش، آزمایش‌ها به روش ناپیوسته انجام شد و نمونه‌های لجن اولیه و ثانویه مورد نیاز نیز به ترتیب از خط تخلیه لجن حوضچه ته‌نشینی اولیه و خط برگشت لجن حوضچه هوادهی تصفیه‌خانه فاضلاب جنوب اصفهان و مطابق با روش‌های استاندارد، نمونه‌برداری شدند. کلیه آنالیزهای صورت گرفته در این پژوهش، مطابق با روش‌های ارایه شده در کتاب "روش‌های استاندارد برای آزمایش‌های آب و فاضلاب" و در آزمایشگاه پایلوت دانشکده بهداشت اصفهان انجام شدند (۱۰). نمونه‌ها پس از جمع آوری به آزمایشگاه منتقل و به صورت زیر مورد آنالیز قرار گرفتند. در این آزمایش‌ها ابتدا نمونه اولیه گرفته شده از لجن‌های اولیه و ثانویه به خوبی مخلوط گردیدند و سپس یک نمونه مخلوط شده از هریک از این لجن‌ها به صورت مجزا گرفته شد و پس از آن کلیه آزمایش‌ها، با این نمونه‌های جدید و طی دو مرحله انجام شدند. با توجه به نتایج دور اول آزمایش‌ها و مطابق با سایر مطالعات انجام شده، مشخص گردید که امواج مایکروویو به تنهایی در دستیابی به اهداف این طرح، از کارایی قابل توجهی برخوردار نیست (۶). به منظور ارتقا کارایی سیستم، درصدهای مختلفی از زغال چوب به نمونه‌های لجن مورد آزمایش افزوده شدند و آزمایش‌ها مجدد تکرار گردیدند. ظروف مورد استفاده در این آزمایش‌ها شامل بشرهای آزمایشگاهی در اندازه‌های مختلف بودند که بر خسب نیاز از آن‌ها استفاده شد. همچنین در هنگام استفاده از کوره الکتریکی جهت تعیین درصد جامدات فرار از بوته‌های چینی استفاده گردید. لازم به ذکر است که نتایج ارایه شده در جداول و نمودارها، به صورت میانگین ۳ بار تکرار آزمایش روی هر نمونه می‌باشند که بر روی آن‌ها آنالیز آماری صورت گرفته است. با توجه به این که در برخی مراحل آزمایش تعدادی از نمونه‌ها به دلایلی مانند افزایش بیش از حد دما و شکسته شدن ظروف محتوی آن‌ها در عمل از دور آزمایش‌ها حذف می‌شدند، تعداد نمونه‌ها برای هر مرحله تا حدودی متفاوت می‌باشند. اما به طور متوسط تعداد ۱۰ نمونه لجن اولیه و ثانویه در هر مرحله آزمایش مورد آنالیز قرار گرفتند. آزمون‌های آماری شامل آزمون‌های غیر پارامتری (Non-Parametric test) مقایسه توزیع داده‌های به دست آمده به عنوان متغیر رتبه‌ای در سه یا بیشتر از سه گروه مستقل از یکدیگر، با فرض عدم پیروی این داده‌ها از توزیع نرمال و همسان نبودن واریانس گروه‌های تحت مطالعه و رتبه‌ای بودن این متغیرها مورد استفاده قرار گرفتند؛ همین طور استقلال گروه‌ها از یکدیگر، مانند آزمون کروسکال

[Downloaded from hsr.mui.ac.ir on 2026-11-07]

www.mui.ac.ir

والیس(Kruskal-Wallis test) و در مواردی که تعداد گروه‌های مورد مقایسه دو عدد بودند، با استفاده از آزمون مان- ویتنی (Mann-Witney u. test) وجود اختلاف‌ها دو به دو تعیین گردید. همچنین به منظور مقایسه نتایج آزمون‌های آماری مانند آزمون آنالیز واریانس یک طرفه (OneWay ANOVA)، جهت مقایسه میانگین‌های متغیر کمی در ۳ یا بیشتر از سه گروه مستقل از یکدیگر و در صورت وجود تفاوت، از آزمون‌های تعقیبی مانند آزمون دانکن (Duncan test) استفاده شد. با این روش با حذف مقایسات مکرر، احتمال این که دو میانگین به طور تصادفی از لحاظ آماری معنی‌دار شوند، از بین می‌رود. اما با توجه به این که در نهایت نتایج حاصل از اکثریت این آزمون‌ها بر هم منطبق بودند، فقط نتایج آزمون‌های آماری غیر پارامتری ارایه گردید.

برای تعیین اثر زمان حرارت‌دهی بر کارایی فرایند، نمونه‌های مختلفی از لجن‌های اولیه و ثانویه به وزن ۲۰ گرم ابتدا به تنهایی و سپس با افزودن حدود ۱ گرم ماده جاذب (زغال چوب) به آن‌ها، در زمان‌های مختلفی شامل ۱، ۳، ۵، ۷ و ۱۰ دقیقه در معرض امواج اجاق مایکروویو خانگی با انرژی ۹۰۰ وات و فرکانس ۲۴۵۰ مگاهرتز قرار گرفتند.

برای تعیین اثر میزان ماده جاذب بر کارایی فرایند نیز نمونه‌های مختلفی از لجن‌های اولیه و ثانویه به وزن ۲۰ گرم که به آن‌ها مقادیر مختلفی شامل ۵، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد وزنی ماده جاذب (زغال چوب) افزوده شده بودند، در زمان‌های پنج و ده دقیقه در معرض امواج اجاق مایکروویو قرار گرفتند.

برای تعیین دمای ایجاد شده در توده لجن، به دلیل بسته بودن محفظه اجاق مایکروویو و عدم امکان استفاده از دماسنج‌های متداول آزمایشگاهی، از دماسنج لیزری پرتابل که نیازی به تماس با توده لجن گرم شده ندارد، جهت سنجش دمای توده لجن استفاده گردید.

در مرحله تعیین کاهش حجم در توده‌های لجن، اولاً به دلیل این که حجم‌های لجن مورد استفاده در این آزمایش‌ها به واسطه اثر شدید امواج مایکروویو و بیرون ریخته شدن آن‌ها از ظروف محتوی بایستی تا حد امکان کم انتخاب می‌شدند و ثانیاً با توجه به کاهش حجم قابل توجه نمونه‌ها، پس از آزمایش و چسبندگی شدید به دیواره ظروف محتوی و عدم امکان تراشیدن و جمع آوری آن‌ها و در دسترس نبودن تجهیزات اندازه‌گیری ویژه آن، به جای اندازه‌گیری حجم نمونه‌ها، کاهش وزن آن‌ها ملاک قرار گرفت و نتایج آن‌ها ارایه گردید.

درصد جامدات کل و جامدات فرار در نمونه‌های لجن قرار گرفته در مایکروویو و کوره الکتریکی بر طبق معادلات زیر تعیین گردید (۱۰).

$$\text{درصد جامدات کل} = \frac{\text{جرم جامدات خشک } (W_3-W_1)}{\text{جرم لجن مرطوب } (W_2-W_1)} \times ۱۰۰$$

$$\text{درصد جامدات فرار} = \frac{\text{جرم جامدات فرار } (W_3-W_6)}{\text{جرم لجن خشک } (W_3-W_1)} \times ۱۰۰$$

در این روابط، W_1 برابر جرم بوته چینی (ظروف تبخیر)، W_2 برابر جرم بوته چینی و نمونه لجن مرطوب، W_3 برابر جرم بوته چینی و نمونه بعد از مرحله خشک کردن، W_4 و W_5 جرم بوته چینی و نمونه بعد از خشک شدن در مایکروویو به ترتیب بعد از ۵ و ۱۰ دقیقه تماس و W_6 جرم بوته چینی و نمونه بعد از مرحله سوزاندن در کوره الکتریکی است و همه وزن‌ها برحسب گرم می‌باشند. این آزمایش‌ها با افزودن مقادیر ۵ و ۱۰ درصد وزنی ماده جاذب اشعه (زغال چوب) دوباره تکرار گردیدند. قابل توضیح است که در محاسبه درصد جامدات کل با توجه به آزمایش‌ها انجام شده مشخص گردید که وزن زغال‌های چوب قرار گرفته در اجاق مایکروویو حدود ۳۰ درصد کاهش می‌یابند؛ بنابراین در هنگام محاسبه حدود ۷۰ درصد وزن زغال را از وزن خشک باقیمانده کسر گردید. لازم به ذکر است که میانگین درصد جامدات خشک لجن اولیه و ثانویه به ترتیب معادل ۱۰ و ۸/۲ بود که تأثیر آن در محاسبات مربوط به نتایج کلیه آزمایش‌ها در نظر گرفته شد.

[Downloaded from hsr.mui.ac.ir on 2026-11-07]

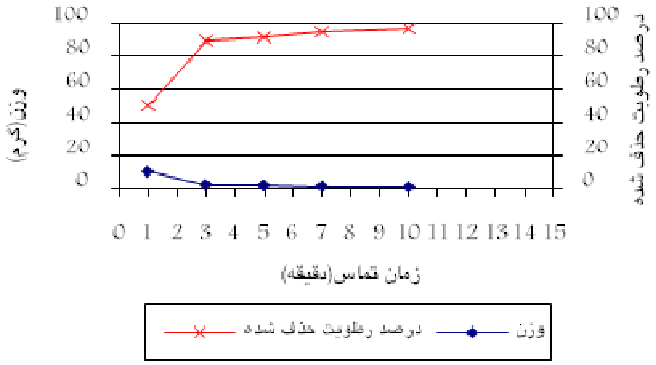
www.mui.ac.ir

در مرحله آزمایش تعیین باکتری‌های کلیفرم به روش MPN و میزان کاهش آن‌ها پس از مراحل آزمایش، ضمن تهیه رقت‌های مختلف از نمونه‌های لجن خام و حرارت دیده و با استفاده از محیط کشت لاکتوز براث برای تست احتمالی و محیط کشت برلیانت گرین بیل براث برای تست تأییدی آنالیزهای این مرحله بر طبق روش استاندارد متد انجام شدند.

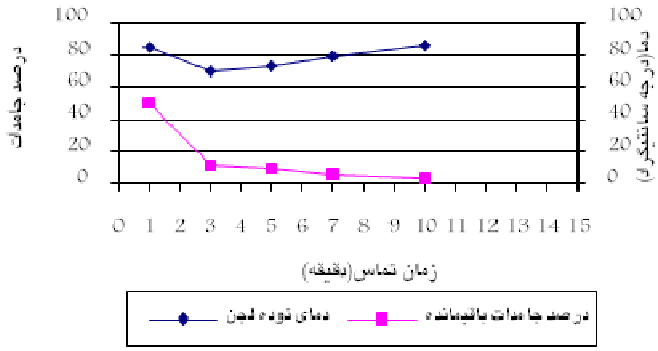
در مرحله آزمایش شمارش باکتری‌های هتروتروفیک (HPC) و تعیین میزان کاهش آن‌ها پس از حرارت‌دهی که به منظور تعیین احتمال رشد باکتری و یا جذب ناقلین، در لجن خشک شده صورت گرفت، از محیط کشت R_2A که در ظروف پتری دیش یک بار مصرف تهیه شده بودند، استفاده گردید. برای کشت و شمارش این نوع باکتری‌ها در لجن‌های خام از نمونه‌های رقیق شده برای آزمایش‌ها MPN استفاده گردید و برای اطلاع و شمارش باکتری‌های هتروتروفیک موجود در لجن‌های خشک شده نیز ضمن حل کردن یک گرم از لجن‌های خشک شده در آب مقطر استریل و اختلاط آن‌ها با شدت و مدت زمان کافی، یک میلی‌لیتر از مخلوط حاصل را با کمک میکروپیپت استریل برداشته شد و درون پلیت‌های حاوی محیط کشت مذکور به مدت دو تا سه روز در انکوباتور با دمای ۳۵ درجه سانتیگراد کشت داده شد و سپس کلونی‌های رشد کرده روی هر پلیت، شمارش شدند.

یافته‌ها

نتایج حاصل از تأثیر افزایش زمان تماس بر کارایی فرایند حرارتی اجاق مایکروویو در کاهش وزن، افزایش درصد حذف رطوبت، کاهش درصد جامدات و افزایش دمای نمونه‌های لجن اولیه در نمودار های ۱ و ۲ نشان داده شدند.



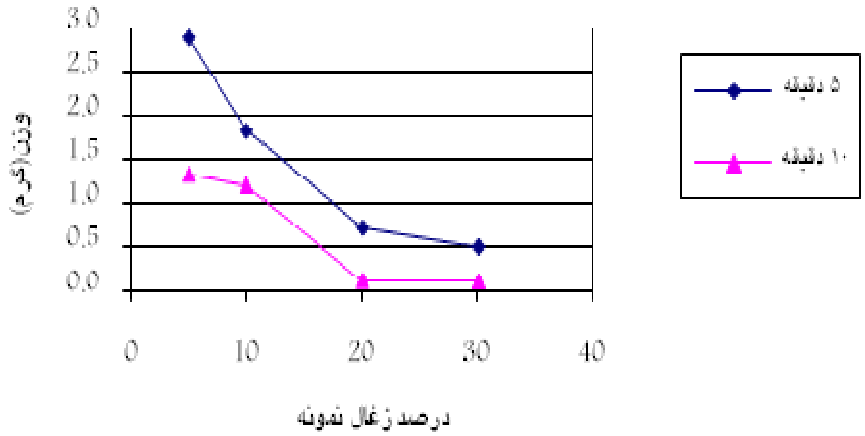
نمودار ۱: کاهش وزن و درصد حذف رطوبت در نمونه‌های لجن اولیه به وزن ۲۰ گرم در زمان‌های تماس مختلف در مایکروویو



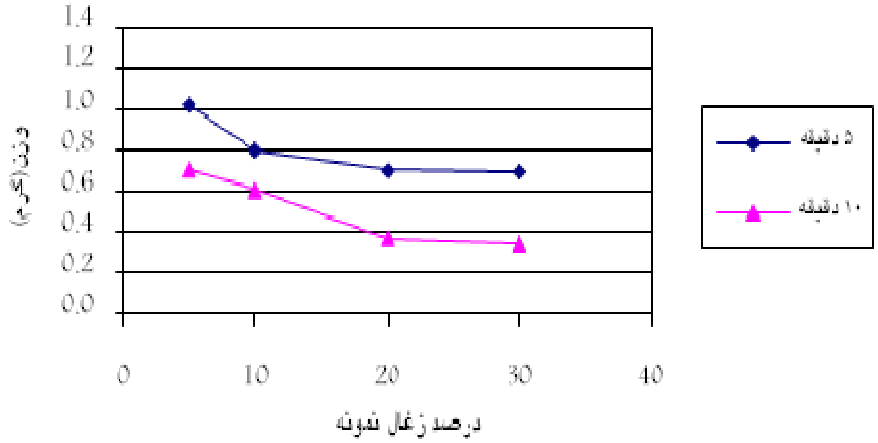
نمودار ۲: کاهش درصد جامدات و افزایش دما در نمونه‌های لجن اولیه به وزن ۲۰ گرم در زمان‌های تماس مختلف در مایکروویو

[Downloaded from hsr.mui.ac.ir on 2026-11-07]

www.mui.ac.ir



نمودار ۳: کاهش وزن نمونه‌های لجن اولیه با تغییر درصد زغال در زمان‌های تماس ۵ و ۱۰ دقیقه در مایکروویو

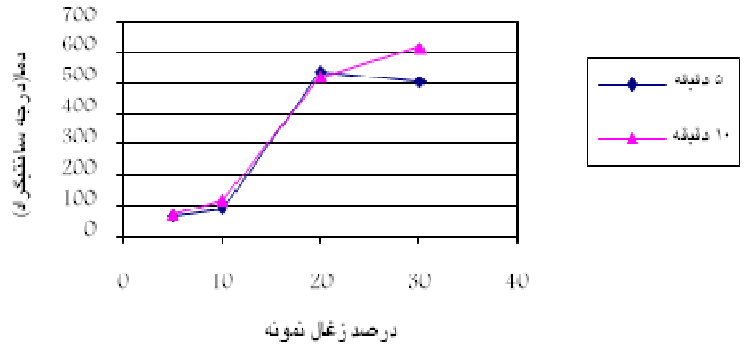


نمودار ۴: کاهش وزن نمونه‌های لجن ثانویه با تغییر درصد زغال در زمان‌های تماس ۵ و ۱۰ دقیقه در مایکروویو

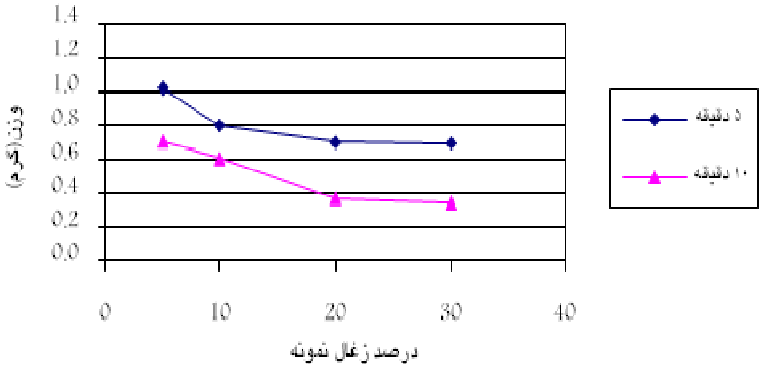
نتایج حاصل از اثر افزودن مقادیر مختلف ماده جاذب بر کارایی اجاق مایکروویو با استفاده از نمونه‌هایی با وزن حدود ۲۰ گرم و تغییر مقادیر وزنی ماده جاذب (زغال) بین ۵، ۱۰، ۲۰ و۳۰ درصد در دو زمان ۵ و ۱۰ دقیقه تماس و با کمک انرژی خروجی ۹۰۰ وات اجاق مایکروویو برای تغییرات وزن خشک، تغییرات دمای توده لجن، تغییرات درصد جامدات باقیمانده خشک و تغییرات درصد رطوبت حذف شده به تفکیک برای لجن‌های اولیه و ثانویه در نمودارهای ۳ تا ۱۰ ارایه شدند.

نتایج ثابت نگاه داشتن مقدار ماده جاذب (زغال چوب) و افزایش زمان در معرض اشعه قرار دادن نمونه‌ها در اجاق مایکروویو بین ۱ تا ۱۰ دقیقه با کمک انرژی خروجی ۹۰۰ وات و تأثیر افزایش زمان بر کارایی فرایند نیز مورد بررسی قرار گرفت که کارایی اجاق مایکروویو در کاهش درصد جامدات و سایر عوامل مورد نظر در تحقیق، در نمودارهای ۱۱ تا ۱۴ ارایه شدند.

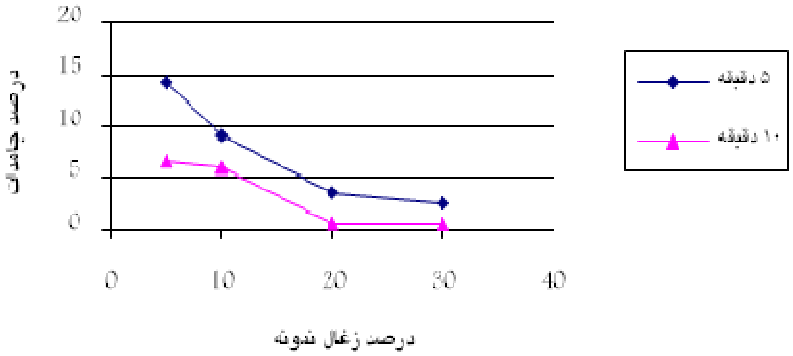
[Downloaded from hsr.mui.ac.ir on 2026-11-07]
www.mui.ac.ir



نمودار ۵: وضعیت تغییرات دمایی در نمونه‌های لجن اولیه با تغییر درصد زغال در زمان‌های تماس ۵ و ۱۰ دقیقه در مایکروویو



نمودار ۶: وضعیت تغییرات دمایی در نمونه‌های لجن ثانویه با تغییر درصد زغال در زمان‌های تماس ۵ و ۱۰ دقیقه در مایکروویو

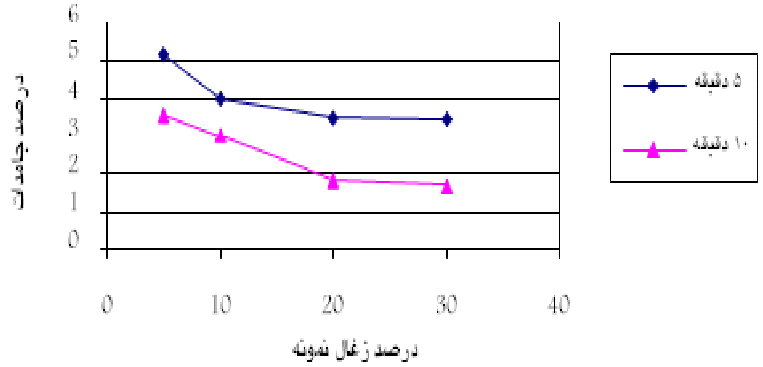


نمودار ۷: تغییر درصد جامدات در نمونه‌های لجن اولیه با تغییر درصد زغال در زمان‌های تماس ۵ و ۱۰ دقیقه در مایکروویو

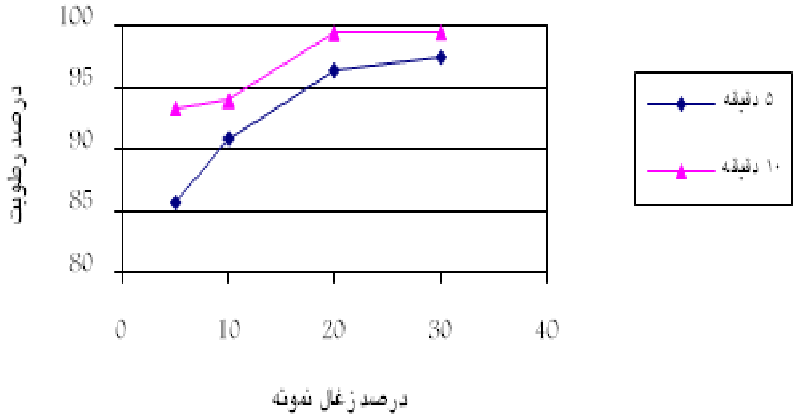
همچنین، آزمایش‌هایی به منظور مقایسه دو راکتور حرارتی مورد استفاده در تحقیق (اجاق مایکروویو و کوره الکتریکی) در کاهش وزن نمونه‌های لجن، درصد خاکستر باقیمانده نمونه‌ها و کاهش درصد جامدات فرار لجن، با افزودن ۵ درصد زغال انجام شدند که نتایج حاصل از آن‌ها در جداول ۱ تا ۳ ارایه شدند.

[Downloaded from hsr.mui.ac.ir on 2026-11-07]

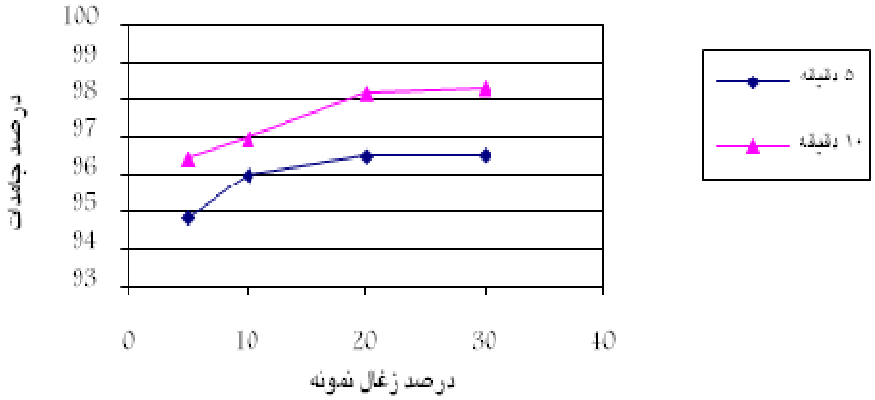
www.mui.ac.ir



نمودار ۸: تغییر درصد جامدات در نمونه‌های لجن ثانویه با تغییر درصد زغال در زمان‌های تماس ۵ و ۱۰ دقیقه در مایکروویو



نمودار ۹: افزایش درصد حذف رطوبت در نمونه‌های لجن اولیه با تغییر درصد زغال در زمان‌های تماس ۵ و ۱۰ دقیقه در مایکروویو



نمودار ۱۰: افزایش درصد حذف رطوبت در نمونه‌های لجن ثانویه با تغییر درصد زغال در زمان‌های تماس ۵ و ۱۰ دقیقه در مایکروویو

[Downloaded from hsr.mui.ac.ir on 2026-11-07]
www.mui.ac.ir

جدول ۱: مقایسه تغییرات وزن نمونه‌های لجن به وزن اولیه ۲۰ گرم حاوی ۵ درصد زغال در راکتورهای مختلف

نوع راکتور	فور آزمایشگاهی	مایکروویو		کوره الکتریکی
	زمان تماس(دقیقه)			
نوع لجن	۱۴۴۰	۵	۱۰	۶۰
لجن اولیه	۱/۶۵	۱/۴۹	۱/۴۶	۱/۲۶
لجن ثانویه	۱/۲	۱/۱۳	۱/۱۲	۱

جدول ۲: مقایسه تغییرات درصد جامدات کل و فرار نمونه‌های لجن به وزن اولیه ۲۰ گرم حاوی ۵ درصد زغال در راکتورهای مختلف

نوع راکتور	فور آزمایشگاهی	مایکروویو		کوره الکتریکی
	زمان تماس(دقیقه)			
	جامدات کل	جامدات فرار		
نوع لجن	۱۴۴۰	۵	۱۰	۶۰
لجن اولیه	۸/۲	۹/۲۵	۱۱/۰۳	۲۳/۲۶
لجن ثانویه	۵/۹۶	۶/۱۶	۶/۹۵	۱۷/۳۴

جدول ۳: مقایسه تغییرات درصد خاکستر باقیمانده (جامدات غیر فرار) نمونه‌های لجن به وزن اولیه ۲۰ گرم حاوی ۵ درصد زغال در راکتورهای مختلف

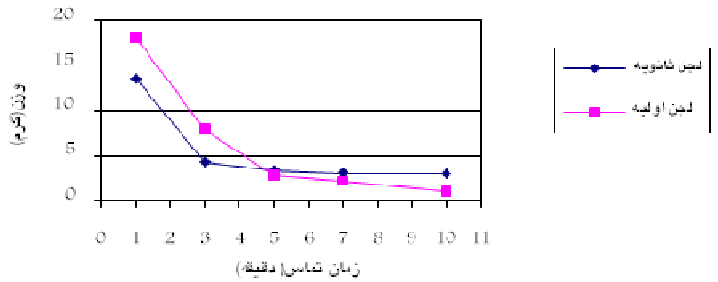
نوع راکتور	فور آزمایشگاهی	مایکروویو		کوره الکتریکی
	زمان تماس(دقیقه)			
نوع لجن	۱۴۴۰	۵	۱۰	۶۰
لجن اولیه	۹۱/۸	۹۰/۷	۸۹	۷۶/۷
لجن ثانویه	۹۴	۹۳/۸	۹۳	۸۲/۷

به منظور تعیین اثر فرایند حرارتی بر کاهش تعداد باکتری‌های کلیفرم کل، آزمایش‌هایی با استفاده از اجاق مایکروویو در مدت زمان تماس ۱۰ دقیقه حاوی ۲۰ و ۳۰ درصد زغال و کوره الکتریکی در دمای ۲۰۰ درجه در مدت زمان ۴ ساعت و همچنین دمای ۵۵۰ درجه به مدت ۱ ساعت با افزودن ماده جاذب انجام شدند، اما با توجه به بالا رفتن درجه حرارت نمونه‌های قرار داده شده در مایکروویو تا حدود ۵۰۰ درجه سانتیگراد و بالاتر و عدم تحمل چنین دماهایی از طرف کلیفرم‌ها، نتیجه آزمایش‌های انجام شده روی این نمونه‌ها منفی هستند یعنی هیچ‌گونه رشد کلیفرمی در آن‌ها مشاهده نگردید. همچنین در نمونه‌های مورد تصفیه با کوره الکتریکی نیز هم به دلیل دارا بودن درجه حرارت نزدیک به ۲۰۰ درجه سانتیگراد و هم طول مدت ۳ تا ۴ ساعت عملیات حرارتی، هیچ‌گونه رشد کلیفرمی در این نمونه‌ها مشاهده نگردید و نتایج این آزمایش‌ها نیز منفی گزارش شدند.

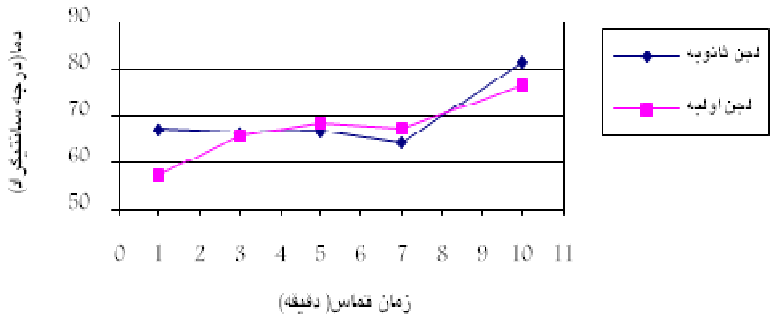
نتایج حاصل از اثر فرایند حرارتی بر کاهش تعداد باکتری‌های هتروتروفیک (HPC) با استفاده از اجاق مایکروویو در مدت زمان تماس ۱۰ دقیقه حاوی ۲۰ و ۳۰ درصد زغال، کوره الکتریکی در دمای ۲۰۰ درجه در مدت زمان ۴ ساعت و همچنین دمای ۵۵۰ درجه به مدت زمان ۱ ساعت با افزودن ماده جاذب نیز به دلایل گفته شده در مورد کلیفرم‌ها، منفی بودند؛ یعنی هیچ‌گونه رشدی نشان ندادند.

[Downloaded from hsr.mui.ac.ir on 2026-11-07]

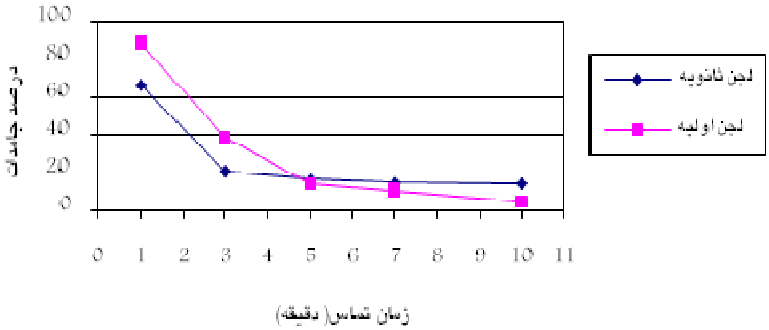
www.mui.ac.ir



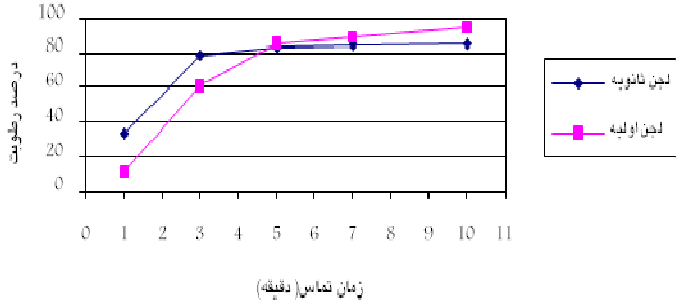
نمودار ۱۱: روند کاهش وزن نمونه‌های لجن به وزن ۲۰ گرم حاوی ۵ درصد زغال در زمان تماس‌های مختلف در مایکروویو



نمودار ۱۲: روند تغییرات دمای نمونه‌های لجن به وزن ۲۰ گرم حاوی ۵ درصد زغال در زمان‌های تماس مختلف در مایکروویو



نمودار ۱۳: روند کاهش درصد جامدات نمونه‌های لجن به وزن ۲۰ گرم حاوی ۵ درصد زغال در زمان‌های تماس مختلف در مایکروویو



نمودار ۱۴: روند افزایش درصد حذف رطوبت نمونه‌های لجن به وزن ۲۰ گرم حاوی ۵ درصد زغال در زمان‌های تماس مختلف در مایکروویو

[Downloaded from hsr.mui.ac.ir on 2026-11-07]

www.mui.ac.ir

بحث

بر اساس نتایج حاصل از نمودارهای ۱ و ۲ ملاحظه می‌شود که به طور کلی با افزایش زمان تماس اجاق مایکروویو در محدوده ۱ تا ۱۰ دقیقه و با استفاده از نمونه‌های لجن اولیه بدون افزودن ماده کمکی، وزن نمونه‌های لجن اولیه کاهش می‌یابد، درصد رطوبت بیشتری از آن‌ها حذف می‌گردد و درصد جامدات باقیمانده خشک نیز کاهش می‌یابد. همچنین مشاهده می‌شود که درجه حرارت توده لجن طی این زمان‌های تماس، اگر چه دچار تغییراتی می‌شود اما در مجموع تغییرات آن قابل توجه نیست. انجام آزمون آماری کروسکال والیس نیز مشخص نمود که بین زمان‌های تماس ۱ تا ۱۰ دقیقه از نظر مشخصات لجن گفته شده در بالا تفاوت معنی‌داری مشاهده می‌شود؛ یعنی افزایش زمان تماس باعث افزایش درصد حذف رطوبت، کاهش وزن و کاهش درصد جامدات باقیمانده خشک در نمونه‌های لجن می‌گردد. در رابطه با دمای نمونه‌ها نیز همان گونه که در نمودار ۲ دیده می‌شود؛ ابتدا بین زمان ۱ تا ۳ دقیقه کاهش و سپس تا زمان ۱۰ دقیقه مجدداً افزایش می‌یابد و به حدود دمای اولیه‌اش می‌رسد. معنی‌دار نبودن آزمون آماری بین دمای توده لجن در زمان تماس ۱ و ۱۰ دقیقه هم نشان دهنده این موضوع می‌باشد. Wang و همکاران نیز به نتایج مشابهی، در زمینه کاهش درصد جامدات لجن در مدت زمان کوتاه اشاره کردند (۹).

در ادامه آزمایش‌ها، مشخص گردید که اگر نمونه‌های لجن بدون افزودن ماده جاذب به مدت ۵ دقیقه در اجاق مایکروویو با انرژی ۹۰۰ وات قرار داده شوند، به همان اندازه‌ای خشک می‌شوند که در مدت زمان ۲۴۰ یا ۳۰۰ دقیقه در کوره الکتریکی با دمای ۲۰۰ درجه قرار گیرند. این موضوع با تحقیقات Menendez و همکاران در این زمینه که با استفاده از اجاق مایکروویو با انرژی ۹۰۰ وات در نمونه‌های لجن هضم شده بدون ماده جاذب، به درصد خشک شدن قابل مقایسه‌ای با کوره الکتریکی دست یافتند، همخوانی دارد (۶).

به منظور مقایسه نتایج حاصل از آزمایش‌های صورت گرفته با اجاق مایکروویو و کوره الکتریکی در کاهش وزن، درصد خاکستر باقیمانده نمونه‌ها و کاهش درصد جامدات فرار لجن، بدون اضافه نمودن ماده جاذب نیز آزمایش‌هایی انجام شدند که نتایج آن‌ها نشان می‌دهند که در کلیه نمونه‌های لجن اولیه و ثانویه بدون افزودن ماده جاذب، که به مدت ۲۴ ساعت در فور آزمایشگاهی خشک گردیدند و سپس برای مدت زمان‌های ۵ و ۱۰ دقیقه در اجاق مایکروویو و تحت این امواج قرار گرفته‌اند، هیچ‌گونه اختلافی بین نتایج حاصل از آن‌ها از نظر کاهش وزن، کاهش درصد جامدات کل و خاکستر باقیمانده آن‌ها وجود ندارد. به عبارت دیگر کارایی فور آزمایشگاهی در مدت زمان ۲۴ ساعت با کارایی مایکروویو در مدت زمان‌های ۵ و ۱۰ دقیقه یکسان است. تحقیقات Menendez و همکاران در این زمینه نیز که با استفاده از اجاق مایکروویو با انرژی ۹۰۰ وات در نمونه‌های لجن هضم شده بدون افزودن ماده جاذب، به کارایی مشابهی در خشک نمودن و تعیین درصد جامدات کل نمونه‌های لجن نسبت به کوره الکتریکی دست یافتند، نیز شاهدی بر این نتایج است (۶)، اما کارایی کوره الکتریکی نسبت به فور آزمایشگاهی و اجاق مایکروویو در دستیابی به کاهش درصد جامدات فرار بیشتر است.

نتایج حاصل از اثر فرایند حرارتی بر کاهش تعداد باکتری‌های کلیفرم کل با استفاده از اجاق مایکروویو در مدت زمان تماس ۱۰ دقیقه و کوره الکتریکی در دمای ۲۰۰ درجه در مدت زمان ۴ ساعت و همچنین دمای ۵۵۰ درجه به مدت ۱ ساعت بدون افزودن ماده جاذب نیز نشان دادند که اجاق مایکروویو توانایی کاهش قابل توجه باکتری‌های کلیفرم در نمونه‌های خشک شده لجن‌های اولیه و ثانویه به ترتیب به میزان ۹۹/۹۹۵ و ۹۹/۹۹۷ درصد یعنی در حدود log ۵ را دارا می‌باشد. به عبارت دیگر بین درصد کاهش باکتری‌های کلیفرمی در اجاق مایکروویو بدون افزودن ماده جاذب با درصد کاهش این باکتری‌ها در کوره الکتریکی، تفاوت معنی‌داری مشاهده می‌گردد. یعنی کارایی این دو روش در حذف باکتری‌های کلیفرمی متفاوت است ($P < ۰/۰۵$).

نتایج حاصل از اثر فرایند حرارتی بر کاهش تعداد

[Downloaded from hsr.mui.ac.ir on 2026-11-07]

www.mui.ac.ir

باکتری‌های هتروتروفیک (HPC) با استفاده از اجاق مایکروویو نیز نشان دادند که این دستگاه توانایی کاهش قابل توجه تعداد باکتری‌های هتروتروفیک در نمونه‌های خشک شده لجن‌های اولیه و ثانویه به ترتیب به میزان ۹۹/۹۹۷ و ۹۹/۹۹۰ درصد یعنی در حدود log ۵ و log ۴ را دارا است. به عبارت دیگر بین درصد کاهش باکتری‌های هتروتروفیک در اجاق مایکروویو بدون افزودن ماده جاذب با درصد کاهش این باکتری‌ها در کوره الکتریکی، تفاوت معنی‌داری مشاهده می‌گردد. یعنی کارایی این دو روش در حذف باکتری‌های هتروتروفیک متفاوت است ($P < ۰/۰۵$).

در ادامه آزمایش‌ها و به منظور افزایش کارایی فرایند حرارتی، درصدهای مختلفی از ماده جاذبی مانند زغال چوب به نمونه‌های لجن افزوده شدند و آزمایش‌ها دوباره تکرار گردیدند که تفسیر نتایج آن‌ها در این قسمت ارایه می‌شود.

بر اساس نتایج نمودارهای ۳ تا ۱۰ مشخص می‌شود که در اثر افزایش مقدار ماده جاذب، کارایی امواج مایکروویو، بر تغییر مشخصات نمونه‌های لجن اولیه افزایش می‌یابد. با انجام آزمون غیر پارامتری کروسکال والیس نیز وجود اختلاف بین مشخصات لجن در مقادیر مختلف ماده جاذب مشاهده گردید؛ یعنی افزایش مقدار ماده جاذب بر کارایی اجاق مایکروویو مؤثر است ($P < ۰/۰۰۱$). نتایج این بخش از آزمایش‌ها در رابطه با افزایش دمای توده نمونه‌ها به بالاتر از ۵۰۰ درجه سانتیگراد، اگر چه با یافته‌های Menendez و همکاران همخوانی دارد اما همان گونه که در نمودارهای ۵ و ۶ هم مشاهده می‌گردد، بالا رفتن دمای توده لجن پس از افزایش درصد ماده جاذب به بالاتر از ۱۰ درصد صورت گرفته است در حالی که محققین مذکور در کمتر از ۵ درصد ماده جاذب به چنین دماهای بالایی دست یافته بودند (۶).

در ادامه این مرحله از آزمایش‌ها، اگر چه افزایش درصد ماده جاذب در ظاهر تأثیر قابل توجهی در کارایی فرایند حرارتی داشت، اما از آن جا که افزایش مقدار آن از ۵ درصد در شرایط واقعی غیر ممکن و یا غیر عملی به نظر می‌رسد (به دلیل نیاز بالا به ماده جاذب، مشکل تهیه آن و مشکلات بهره‌برداری در مقیاس واقعی)، از این رو برای ادامه کار و به منظور تعیین کارایی اجاق مایکروویو در کاهش درصد جامدات و سایر عوامل مورد نظر در طرح تحقیقاتی، در این آزمایش‌ها از میزان ۵ درصد ماده جاذب استفاده گردید. بنابراین با ثابت نگاه داشتن مقدار ماده جاذب (زغال چوب) و افزایش مدت زمان در معرض اشعه در اجاق مایکروویو بین ۱ تا ۱۰ دقیقه با انرژی خروجی ۹۰۰ وات، تأثیر افزایش زمان بر کارایی فرایند، مورد بررسی قرار گرفت. کارایی اجاق مایکروویو در کاهش درصد جامدات و سایر عوامل مورد نظر در تحقیق در نمودارهای ۱۱ تا ۱۴ ارایه شده است. در این ارتباط مشخص شد که با افزایش زمان اشعه‌دهی در اجاق مایکروویو، به طور کلی کارایی آن در کاهش وزن، افزایش حذف درصد رطوبت نمونه‌های لجن اولیه و ثانویه افزایش یافت اما روند این تغییرات در فاصله زمانی ۱ تا ۵ دقیقه بیشتر و در فاصله ۵ تا ۱۰ دقیقه کندتر است. در رابطه با تغییرات دمایی هم اگر چه نتایج آزمون‌های آماری، مؤثر بودن زمان تماس را در افزایش دمای توده نمونه‌ها نشان می‌دهند ولی همان گونه که از نمودار ۱۲ نیز به نظر می‌رسد، روند تغییرات دمایی در فاصله زمانی ۱ تا ۱۰ دقیقه دستخوش نوسانات زیادی است.

همچنین از نتایج آزمایش‌ها مقایسه‌ای دو راکتور حرارتی مورد استفاده در تحقیق (اجاق مایکروویو و کوره الکتریکی) در جداول ۱ تا ۳ مشخص شد که اجاق مایکروویو در کاهش وزن، درصد جامدات کل و فرار نمونه‌های لجن اولیه نسبت به فور آزمایشگاهی مؤثرتر است. از طرف دیگر کوره الکتریکی هم نسبت به اجاق مایکروویو در دستیابی به مشخصات مطلوب‌تر مورد نظر در نمونه‌های لجن اولیه مؤثرتر است ($P < ۰/۰۰۱$). این موضوع با تحقیق Menendez و همکاران در این زمینه که با استفاده از اجاق مایکروویو با انرژی ۹۰۰ وات در نمونه‌های لجن هضم شده حاوی ۵ درصد ماده جاذب، به کارایی بهتری در حذف درصد جامدات فرار نسبت به کوره الکتریکی دست یافتند، همخوانی ندارد (۶).

در مجموع آن چه که از نتایج این تحقیق حاصل گردید مشخص می‌نماید که با افزودن درصدهای مختلفی (بین ۵ تا

[Downloaded from hsr.mui.ac.ir on 2026-11-07]

www.mui.ac.ir

۳۰ درصد) از موادی مانند زغال چوب که بر طبق تحقیق جاذب امواج مایکروویو می‌باشند (۶)، کارایی اجاق مایکروویو در کاهش وزن نمونه‌های لجن، حذف درصد رطوبت محتوی نمونه‌ها و تغییرات دمایی در توده نمونه‌های لجن افزایش می‌یابد، ولی این موضوع در مورد درصدهای ماده جاذب بین ۱۰ و ۲۰ درصد صادق نیست و تقریباً کارایی مایکروویو در بین این مقادیر از ماده جاذب، با هم تفاوتی ندارد. از سوی دیگر مشاهده شد که در مقادیر ماده جاذب ۲۰ یا ۳۰ درصد، دمای ایجاد شده در توده لجن تا حدود ۶۰۰ درجه سانتیگراد بالا رفته است و با توجه به مفاهیم فرایند پیرولیز و تحقیق انجام شده در این زمینه، می‌توان چنین قضاوت نمود که به احتمال در این گونه نمونه‌ها، پیرولیز نیز صورت گرفته است (۶).

با افزایش زمان‌های حرارت‌دهی، کارایی اجاق مایکروویو در کاهش وزن نمونه‌های لجن و حذف درصد رطوبت محتوی نمونه‌ها افزایش یافت، اما چون در دستگاه‌هایی مانند اجاق مایکروویو خانگی که از آن برای پخت سریع مواد غذایی استفاده می‌شود و استفاده از زمان‌های حرارت‌دهی بیشتر از ۱۰ دقیقه در عمل ممکن است دستگاه را با مشکل مواجه سازد، در این تحقیق در نهایت از ۱۰ دقیقه زمان تماس استفاده گردید، ولی در صورت استفاده از این روش در محیط‌های واقعی و با کاربرد دستگاه‌های مایکروویو صنعتی و انجام آزمایش‌های در مقیاس پایلوت و همچنین مقایسه فنی و اقتصادی در استفاده از زمان‌های حرارت‌دهی بالاتر از ۱۰ دقیقه، در صورتی که به کارایی بالاتر از آن چه در این تحقیق به آن دست یافته است، نایل گردد نیز می‌تواند امکان پذیر باشد. از سوی دیگر در صورت استفاده از اجاق‌های مایکروویو آزمایشگاهی که در آن‌ها امکان کنترل عملیات، مانند تنظیم فشار محیطی و خروج گازهای تولیدی حین فرایند ممکن باشد، نیز می‌تواند در دستیابی به نتایج بهتر مؤثر باشد.

همچنین نگاهی به نتایج حاصل از انجام آزمایش با کوره الکتریکی در دمای ۲۰۰ درجه سانتیگراد نشان داد که استفاده از دستگاه‌هایی مانند آن، که در طول زمان حرارت‌دهی، دمای ثابتی را در نمونه‌ها ایجاد می‌نمایند، نسبت به اجاق مایکروویو که به واسطه ایجاد جنبش مولکولی سبب گرم شدن توده نمونه می‌شود و از پدیده تشکیل نقاط داغ تبعیت می‌نماید و ممکن است در زمان‌های تماس کم به عنوان مثال ۵ دقیقه، کارایی بهتری از خود نشان ندهد؛ اما در مجموع به لحاظ طولانی‌تر بودن زمان انجام عملیات و مصرف انرژی بیشتر در کوره الکتریکی، به منظور رساندن دمای نمونه‌ها به محدوده مورد نظر کاربرد آن‌ها در خشک کردن، اقتصادی نخواهد بود. همچنین در مدت زمان تماس ۱۰ دقیقه، کارایی اجاق مایکروویو با کارایی کوره الکتریکی در زمان‌های ۲۴۰ یا ۳۰۰ دقیقه تقریباً یکسان است. در آزمایشگاه‌های کنترل فرایندی تصفیه‌خانه‌های آب و فاضلاب، کوتاه شدن زمان رسیدن به نتایج نمونه‌برداری‌ها، می‌تواند منجر به انجام عملیات سریع‌تر در بهره‌برداری و نگهداری از تصفیه‌خانه‌ها شود. بنابراین استفاده از تجهیزات پیشرفته‌ای مانند استفاده از امواج مایکروویو می‌تواند در دستیابی هر چه سریع‌تر به نتایج نمونه‌برداری‌ها به این بهره‌برداران کمک نماید.

در این آزمایش‌ها همچنین مشخص گردید که روند تغییر مشخصات نمونه‌ها بدون افزودن ماده جاذب همانند نمونه‌های حاوی درصدهای مختلفی از ماده جاذب است و تنها اختلاف آن‌ها در افزایش دما در توده نمونه‌های لجن است. به این معنی که در صورت حرارت‌دهی نمونه‌ها به تنهایی، این نمونه‌ها فقط خشک می‌گردند و رطوبت خود را از دست می‌دهند اما اگر به آن‌ها درصدهایی از مواد جاذب اشعه افزوده شود، علاوه بر خشک شدن، فرایند پیرولیز هم در آن‌ها صورت می‌گیرد و نمونه‌های لجن ضمن هضم شدن، تثبیت می‌گردند.

در نمونه‌هایی که به آن‌ها ۵ درصد ماده جاذب افزوده شد، کارایی اجاق مایکروویو در حذف رطوبت و افزایش درصد جامدات فرار در زمان‌های تماس ۵ و ۱۰ دقیقه نسبت به فور آزمایشگاهی با دمای ۱۰۳ تا ۱۰۵ درجه سانتیگراد بیشتر و از کوره الکتریکی با زمان تماس یک ساعت در دمای ۵۵۰ درجه سانتیگراد کمتر است؛ اما در نمونه‌هایی که هیچ ماده افزودنی به آن‌ها اضافه نشد، اجاق مایکروویو دارای کارایی مشابهی با فور آزمایشگاهی و کارایی کمتر نسبت به کوره الکتریکی

[Downloaded from hsr.mui.ac.ir on 2026-11-07]

www.mui.ac.ir

داشت. در مجموع همان گونه که در بالا نیز گفته شد، اگر نمونه‌ها به تنهایی در اجاق مایکروویو در مدت ۵ یا ۱۰ دقیقه قرار داده شوند به همان اندازه‌ای خشک می‌شوند که در مدت ۲۴ ساعت در فور آزمایشگاهی با دمای ۱۰۳ تا ۱۰۵ درجه سانتیگراد قرار داده شوند.

اجاق مایکروویو در رابطه با کاهش تعداد باکتری‌های کلیفرمی و شمارش باکتری‌های هتروتروفیک در نمونه‌های لجن حاوی درصدهایی از ماده جاذب (۲۰ تا ۳۰ درصد)، قادر است تا ۱۰۰ درصد فلور میکروبی نمونه‌ها را از بین ببرد و آن‌ها را به صورت استریل درآورد. اما در نمونه‌های لجن اولیه و ثانویه‌ای که به آن‌ها ماده جاذبی اضافه نگردید، ضمن کاهش باکتری‌های کلیفرم در حدود ۹۹/۹۹۶ درصد، می‌توان با استفاده از فرایند انجام شده در اجاق مایکروویو، تعداد باکتری‌های هتروتروفیک نمونه‌های لجن را نیز در حدود ۹۹/۹۹۴ درصد (به طور متوسط بین نمونه‌های لجن اولیه و ثانویه) کاهش داد که به عنوان مثال از فرایندهایی که پاتوژن‌ها را به میزان قابل توجهی کاهش می‌دهند نام برد؛ یعنی این لجن‌ها همچنان پتانسیل بیماری‌زایی را دارا هستند و کاربرد مستقیم آن‌ها در کشاورزی ممکن است محدود باشد.

اطلاعات حاصل از این تحقیق در مجموع مشخص می‌سازند که در صورتی که نمونه‌های لجن به تنهایی تحت اشعه مایکروویو در زمان‌های مختلف قرار گیرند، فقط خشک می‌گردند و رطوبت خود را از دست می‌دهند؛ اما اگر به آن‌ها درصدهایی از مواد جاذب اشعه مانند زغال چوب افزوده شود، علاوه بر خشک شدن، به دلیل افزایش بیش از حد دما در توده نمونه‌ها، احتمال رخ دادن فرایند پیرولیز در آن‌ها افزایش می‌یابد و نمونه‌های لجن ضمن هضم شدن، تثبیت می‌گردند. جدای از کاربردهای بسیار اختصاصی حرارت‌دهی مایکروویو که نمونه‌هایی از آن در این تحقیق بیان گردید، تا کنون این فرایند کاربردهای تجاری بسیار کمی در مهندسی محیط زیست داشته است که به چندین دلیل می‌باشد. دلیل اول آن است که اطلاعات پایه‌ای کمی درباره خصوصیات مواد دی‌الکتریک وجود دارند. دومین دلیل برای عدم گسترش استفاده از فرایندهای حرارتی مایکروویو، کم بودن آگاهی درباره طرح تجهیزات حرارتی مایکروویو می‌باشد. بدون آگاهی از خصوصیات دی‌الکتریک مواد، اجاق‌های مایکروویو نمی‌توانند طراحی شوند. در نتیجه آگاهی مفصلی از مهندسی مایکروویو قبل از این که هر فرایندی بتواند به طور مؤثری توسعه یابند، در مقیاس پایلوت و یا صنعتی، مورد نیاز می‌باشد. اما به هر حال، فرایندهای انجام گرفته با مایکروویو صرفاً از جنبه کاهش مصرف انرژی مفید نمی‌باشد، با این وجود سایر فایده‌های آن، از جمله صرفه‌جویی زمانی فرایند، افزایش محصول فرایند و سازگاری‌های زیست محیطی را نیز بایستی در نظر داشت. آشکار است که فرایندهایی که تعدادی از این فایده‌ها را داشته باشند می‌توانند کاندیداهای خوبی برای توسعه آتی باشند. بنابراین با عنایت به مطالب گفته شده، این تحقیق در مقیاس آزمایشگاهی انجام گردید و امید است با انجام تحقیقات مفصل‌تر بعدی در این زمینه، بتوانند راه‌گشایی برای دستیابی به انرژی‌های پاک و جدید زیست محیطی باشند.

References

1. McFarland MJ. Biosolids engineering. New York: McGraw-Hill; 2001.
2. Metcalf, Eddy. Wastewater engineering: treatment and reuse. 4th ed. New York: McGraw-Hill; 2003.
3. Kord I. Survey of lime influence on microbial characteristics of raw sludge of south Isfahan wastewater treatment plant [dissertation]. Isfahan: Isfahan University of Medical Sciences; 2002. [In Persian].
4. Hosseinian M. Principals of Municipal and Industrial Wastewater treatment plants. 2nd ed. Tehran: Ayandehsazan: Shahr-e-Ab; 1998. [In Persian].
5. Jones DA, Lelyveld TP, Mavrofidis SD, Kingman SW, Miles NJ. Microwave heating applications in environmental engineering-a review. Resources, Conservation and Recycling. 2002; 34(2): 75-90.

[Downloaded from hsr.mui.ac.ir on 2026-11-07]

www.mui.ac.ir

6. Menendez JA, Inguanzo M, Pis JJ. Microwave-induced pyrolysis of sewage sludge. Water Res. 2002; 36(13): 3261-4.

7. Collins AG, Mitra S, Pavlostathis SG. Microwave heating for sludge dewatering and drying. Research journal of the Water Pollution Control Federation. 1991; 63(6): 921-4.

8. Liao PH, Wong WT, Lo KV. Release of phosphorus from sewage sludge using microwave technology. J Environ Eng Sci. 2005; 4(1): 77-81.

9. Wang W, Qiao W.Microwave thermal pretreatment of sewage sludge. [Cited 28 February 2010]; Available from: http://www.paper.edu.cn/index.php/default/en_releasepaper/downPaper/200602-299

10. Clescerl LS, Greenberg AE, Eaton AD, editors. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater.20th ed. Washington, D.C: American Public Health Association; 1999.

[Downloaded from hsr.mui.ac.ir on 2026-11-07]

www.mui.ac.ir

Performance comparison of the microwave oven and conventional electrical furnace in the volume reduction and final stabilization of the south Isfahan wastewater treatment plant's sludges*

***Afshin Ebrahimi*[1], *Hossein Movahedian Attar*[2]**

Abstract

Background: The Biological Solids produced during wastewater treatment processes are called sludge. As sludge contains various sickening microorganisms such as pathogens, organic and inorganic substances and has adverse effects on human and environment, therefore it should be treated and processed entirely prior to disposal and then disposed in line to the environmental regulations. Thermal treatment is one of the sludge treatment methods. Among these, microwave as one of the methods, could have an important role in sludge treatment. This study investigated the Microwave application to reduce volume and the final stabilization in primary and secondary sludge produced by south Isfahan WWTP in comparison with conventional laboratory electrical furnace.

Methods: A batch system was set up to compare the microwave oven and electrical furnace in converting the primary and secondary sludge in south Isfahan WWTP (as a sample only and with adsorbent addition). The effects of relevant parameters tested were included the contact times between 1 and 10 minutes for microwave oven and 240 and 300 minutes for the electrical furnace, heating and the adsorbent dosage in the range of 5 to 30 (w/w%) affect of the sludge mass temperature production, weight reduction percentage and total and volatile reduction percentage, coliform and HPC decrease.

Findings: The study relieved that by increasing the radiation time, the microwave oven performance on the sludge sample increased significantly. In the samples with different percentages of adsorbent addition, the mass temperature increased to 600°c in microwave oven, however, in the samples treated in electrical furnace or with no adsorbent addition (in the microwave oven) no significant effect was observed on the temperature. Overall the study findings on the microbiological characteristics also indicated that the sludge samples contain different percentages of adsorbent addition. The removal efficiency of coliforms and HPC increased up to 100% the microwave oven but in the samples with no adsorbent addition it was able to reduce them to 4.5 and 5 log respectively.

Conclusion: Overall data achieved from the study revealed that, if the sludge samples without adsorbent additives are placed under microwave radiation exposures in different times scales, they only are dried lose their humidity, but with different adsorbent addition dosage, in addition to drying, due to excessive temperature increasing in the sample mass, Pyrolysis process may occur and then the sludge samples are stabilized during digestion.

Key Words: Microwave, Sewage Sludge, Thermal Treatment

[Downloaded from hsr.mui.ac.ir on 2026-11-07]

* This article was extracted from research project No 285026 by Isfahan University of Medical Sciences.

1- Assistant Professor, Environment Research Center, Isfahan University of Medical Sciences, Isfahan, Iran (Corresponding Author)
Email: a_ebrahimi@hlth.mui.ac.ir
3- Professor, Environment Research Center, Isfahan University of Medical Sciences, Isfahan, Iran.

www.mui.ac.ir