پژوهشکده محیط زیست

پژوهش و فناوری محیط‌زیست

وبگاه نشریه: www.journal.eri.acecr.ir

شاپا الکترونیکی: ۳۰۶۰-۲۶۷۶

کاهش بار آلی فاضلاب کارخانه تولید روغن زیتون به روش تصفیه شیمیایی و بیولوژیک

هانیه میربلوکی[1]✉، آریامن قویدل[2]

۱- گروه مهندسی محیط زیست، پژوهشکده محیط زیست جهاد دانشگاهی، رشت، ایران

۲- عضو هیات علمی سازمان جهاد دانشگاهی گیلان، رشت، ایران

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
پژوهشی

تاریخ دریافت:
۱۴۰۴/۱۰/۰۶

تاریخ پذیرش:
۱۴۰۴/۱۲/۲۶

دسترسی آنلاین:
۱۴۰۴/۱۲/۲۷

کلید واژه‌ها:
فاضلاب کارخانه روغن زیتون،
COD،
تصفیه شیمیایی،
تصفیه بیولوژیک

چکیده

پساب آلاینده ناشی از صنعت تولید روغن زیتون، به‌دلیل بار آلودگی بالا، یک چالش بوم‌شناختی جدی محسوب می‌شود. میزان تقاضای اکسیژن شیمیایی (COD) در این فاضلاب به شدت بالاست و به‌علت وجود ترکیبات فنول، در مقابل تجزیه بیولوژیکی بسیار مقاوم است. در پژوهش آزمایشگاهی-کاربردی حاضر، در ابتدا روش تصفیه شیمیایی انعقاد و لخته‌سازی برای کاهش سمیت فاضلاب بکار گرفته شد و سپس به منظور مراحل تکمیلی تصفیه و بی‌خطرسازی مواد باقیمانده نهایی، تصفیه بیولوژیک به روش‌های بی‌هوازی و هوازی مورد استفاده قرار گرفت. نتایج بدست آمده از بررسی‌های آزمایشگاهی نشان داد که روش شیمیایی بیش از ۵۰ درصد از بارآلی و سمی فاضلاب را حذف کرد. در نهایت، میزان COD فاضلاب خروجی از فرآیند تصفیه زیستی به ۱۱۰۰ mg/L رسید و شرایط ورود به تصفیه‌خانه فاضلاب شهری را احراز کرد. بر این اساس، پژوهش انجام شده، راه حل مناسبی برای مرتفع کردن چالش‌های محیط زیستی ناشی از صنایع فرآوری زیتون ارائه می‌کند.

✉پست الکترونیکی نویسنده مسئول: h.mirbolooki@gmail.com

Journal of Environmental Research and Technology, 10(18)2025. 152-163

Journal of Environmental Research and Technology

journal homepage: www.journal.eri.acecr.ir

Environmental Research institute

Online ISSN: 2627-3060

Reducing the Organic Load of Olive Oil Mill Wastewater using Chemical and Biological Treatment Methods

Hanieh Mirbolooki[1]✉, Aryamen Ghavidel[2]

1- Department of Environmental Engineering, Environmental Research Institute, Academic Center for Education, Culture and Research (ACECR), Rasht, Iran
2- Faculty member, Academic Center for Education, Culture and Research (ACECR), Rasht, Iran

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received:
2025/12/27
Accepted:
2025/11/17
Available online:
2026/03/18

Keywords:
Olive oil mill wastewater,
COD,
Chemical treatment,
Biological treatment

Abstract

Contaminant effluent from olive oil production industry, due to high pollution load is a serious ecological challenge. The amount of chemical oxygen demand (COD) is very high in this wastewater and is very resistant to biodegradation due to phenol compounds. In the present experimental- applied work, the chemical coagulation and flocculation treatment method was used to reduce the toxicity of wastewater and then, for complementary treatment procedures and detoxification the final residues, biological treatmen was used for anaerobic and aerobic processes. the results of the laboratory studies showed that chemical method removed more than 50% of wastewater's organic and toxic load and ultimately, the COD removal rate of the effluent from the biological treatment process reached 1100 mg/L, meeting the requirements for discharge into the municipal wastewater treatment plant. Accordingly, the conducted research presents an appropriate solution for addressing the environmental challenges arising from olive processing industries.

✉ Corresponding author E-mail address: h.mirbolooki@gmail.com

مقدمه

تولید جهانی پساب کارخانه زیتون سالانه ۴۰ میلیون مترمکعب برآورد می‌شود و بیش از ۷۵ درصد از تولید جهانی روغن زیتون در جهان را کشورهای مدیترانه‌ای به خود اختصاص داده‌اند (جیا[۱] و همکاران، ۲۰۲۴).

فاضلاب صنایع فراوری زیتون با مقادیر قابل‌توجهی ترکیبات آلی (حتی تا ۲۰۰ میلی‌گرم بر لیتر)، اسیدیته و ذرات معلق بالا، ترکیبات فنولیک و مقاومت در مقابل تجزیه بیولوژیکی شناخته می‌شود که در صورت عدم تصفیه و تخلیه به محیط زیست، مخاطرات جدی مانند سمیت خاک، تخریب کیفیت آب زیرزمینی و کاهش رشد گیاه به علت وجود فلزات سنگین مختلف از جمله آهن، سرب، مس، روی، منیزیم، کادمیوم و نیکل به دنبال دارد (محسین[۲] و همکاران، ۲۰۲۳؛ تورنا[۳] و یلدیز[۴]، ۲۰۲۴). علاوه بر این، می‌تواند علت اصلی یوتریفیکاسیون[۵] باشد زیرا بالاتر از حدود تعیین شده استاندارد، حاوی نیتروژن (۶۰ میلی‌گرم بر لیتر) و فسفر (۵۵ میلی‌گرم بر لیتر) است (مصطفی فلیفل[۶] و همکاران، ۲۰۲۴). بنابراین، براساس ترکیب این فاضلاب، تخلیه مستقیم آن به منابع طبیعی در کشورهای مختلف ممنوع است و باید قبل از رسیدن به تصفیه‌خانه فاضلاب، تحت برخی تیمارهای اولیه قرار گیرد (کاتسوس و همکاران، ۲۰۱۸؛ هداجی[۷] و همکاران، ۲۰۲۲).

تاکنون روش‌های تصفیه مختلفی برای حذف ترکیبات فنولی شامل تبخیر، کمپوست‌سازی، انعقاد و لخته‌سازی، و روش الکتروکوآگولاسیون به‌کار گرفته شده است و روش‌های درمانی ذکر شده محدودیت‌های زیادی از جمله هزینه‌های بالا و بازده پایین را نشان می‌دهند (بویاخساس[۸] و همکاران، ۲۰۲۳؛ ژائو[۹] و همکاران).

در سال ۲۰۲۶، تحقیقی در ارتباط با روش تلفیقی الکتروکوآگولاسیون- تصفیه زیستی متوالی بر فاضلاب خروجی از کارخانه روغن زیتون انجام شد؛ هدف از انجام این تحقیق ارزیابی یک روش تصفیه متوالی اولیه با ترکیب الکتروکوآگولاسیون و زیست پالایی قارچی برای خالص‌سازی پساب کارخانه زیتون رقیق‌شده با نسبت ۱ : ۱۰ بوده است. هدایت الکتریکی که با الکترودهای آلومینیومی مدت ۴ ساعت انجام شد، به کاهش اولیه COD از ۹۵۲۰ به ۴۰۹۶ میلی‌گرم بر لیتر و تا حدودی در ترکیبات فنولی دست یافت. پس از آن تیمار بیولوژیکی با آسپرژیلوس نیجر به مدت ۷۲ ساعت، COD را به ۲۸۵۶ میلی‌گرم بر لیتر کاهش داد. همچنین، پساب تصفیه شده بهبود فیزیکوشیمیایی مشخصی را نشان داد، از جمله کاهش کدورت تا NTU ۱۵، pH نزدیک خنثی (۷/۱) و هدایت الکتریکی ۱۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر. هزینه عملیاتی فرآیند تلفیقی ۱/۷۵ دلار بر متر مربع برآورد شد (فهرنی[۱۰] و همکاران، ۲۰۲۶).

در سال ۲۰۲۴، مقاله‌ای توسط جیا و همکاران در ارتباط با تصفیه فاضلاب روغن زیتون به چاپ رسید؛ هدف از انجام این تحقیق، حذف ترکیبات پلی فنلی فاضلاب روغن زیتون از طریق ترکیب فرآیند انعقاد با منعقد کننده آهک فعال و اکسیداسیون پیشرفته با استفاده از پراکسید هیدروژن و بررسی تأثیر عوامل موثر بر عملکرد تصفیه بود. بدین منظور، بهینه‌سازی با استفاده از روش طراحی تجربی انجام شد و نتایج به‌دست‌آمده در مقایسه با مطالعات مشابه بسیار قابل‌توجه بود. با اعمال شرایط بهینه، ۲۶/۵ میلی‌لیتر پراکسید هیدروژن و زمان واکنش ۲/۵ دقیقه، بازده حذف برای پلی فنل ۹۶/۲ درصد؛ برای COD، ۹۸/۵ درصد و برای کدورت ۹۴ درصد بدست آمد (جیا[۱۱] و همکاران، ۲۰۲۴).

---

[1] Jyia
[2] Mohssine
[3] Turna
[4] Yıldız
[5] Eutrophication
[6] Moustafa Fleyfel
[7] Haddaji
[8] Bouyakhsass
[9] Zhao
[10] Fahrni
[11] Jyia

در سال ۲۰۲۴، مطالعه‌ای بر فرآیندهای انعقاد / لخته‌سازی و فیلتراسیون به منظور کاهش بار آلودگی پساب مراحل فرآوردی روغن زیتون برای استفاده مجدد در آبیاری باغ زیتون، مورد بررسی قرار گرفت (مصطفی فلیفل[1] و همکاران، ۲۰۲۴). در ابتدا دو مرحله انعقاد / لخته‌سازی متوالی به نمونه فاضلاب سانتریفیوژ شده اعمال شد. بعد از انجام بررسی‌های آزمایشگاهی بین مواد منعقد کننده مختلف، در شرایط بهینه، آهک و سولفات آلومینیوم به عنوان منعقد کننده انتخاب شدند. سپس، کارایی سیستم‌های فیلتراسیون مختلف با استفاده از کربن فعال و مواد طبیعی شامل هسته زیتون، برگ زیتون، شن و ماسه مورد آزمایش قرار گرفت، بر اساس نتایج، میزان کاهش به ترتیب ۵۱ , ۳۷ و ۲۶ درصد برای پارامترهای TSS , Ec و COD بود و امکان حذف ۹۷ درصدی ترکیبات فنولی نیز میسر شد.

بوئیگا[2] و همکاران در سال ۲۰۲۴، چین و همکاران در پژوهشی به بررسی روش تصفیه زیستی در حذف ترکیبات فاضلاب کارخانه تولید روغن زیتون پرداختند؛ نمونه‌ها از چهار منطقه مراکش جمع‌آوری شدند. چندین سویه کپک، مخمر و باکتری جداسازی و خالص‌سازی شدند. نتایج آزمایش،کاهش معنی‌داری در تقاضای اکسیژن شیمیایی (COD) تا ۷۱/۴۴ درصد، تقاضای اکسیژن بیوشیمیایی (BOD_5) تا ۶۹/۹۱ درصد و میزان پلی فنول ها تا ۸۴/۲۲ درصد را نشان داد (بوئیگا و همکاران، ۲۰۲۴).

خانی و همکاران در سال ۱۳۹۸، به بررسی تصفیه و معدنی‌سازی فاضلاب صنعت روغن‌کشی زیتون با استفاده از فرایند تلفیقی الکتروکواگولاسیون و روش‌های اکسیداسیون پیشرفته پرداختند. شرایط بهینه بازده حذف کدورت، BOD و TOC، به ترتیب معادل ۷۸، ۵۷ و ۷۲ درصد به ازای هر لیتر پساب محاسبه شد. بر اساس نتیجه‌گیری نهایی، فرآیند الکتروکوآگولاسیون به همراه اکسیداسیون پیشرفته $COP/US/H_2O_2$ علاوه بر اینکه باعث تصفیه پذیری فاضلاب مورد بررسی شد، تصفیه‌پذیری بیولوژیکی آن را نیز افزایش داد (خانی[3] و همکاران، ۲۰۱۹؛ بارتی[4] و همکاران، ۲۰۲۳).

همچنین، در تحقیقی مشابه در سال ۲۰۲۲، خطابی و همکاران به بهینه‌سازی فرآیند انعقاد جهت تصفیه پساب کارخانه روغن زیتون با استفاده از مورینگا اولیفرا[5] به عنوان یک منعقد کننده طبیعی پرداختند؛ این فرآیند با استفاده از روش طراحی آزمایش‌ها و طرح مرکب مرکزی (CCD) بهینه‌سازی شده است. بهینه‌سازی رابطه بین ۳ پاسخ (کدورت، COD و پلی فنول) و ۴ متغیر مستقل (غلظت منعقد کننده، pH، سرعت همزدن و زمان) را توصیف می‌کند. شرایط بهینه برای تصفیه فاضلاب با استفاده از مورینگا اولیفرا به ترتیب عبارت است از pH برابر با ۶، سرعت همزدن rpm ۳۵ و زمان همزدن ۲۵ دقیقه. در این شرایط بازده حذف کدورت، COD و پلی فنول به ترتیب ۹۶ ، ۸۸ و ۸۶ درصد است (خطابی[6] و همکاران، ۲۰۲۲).

از آنجا که فاضلاب مورد بررسی، ۲۰۰ تا ۴۰۰ مرتبه سمی‌تر از فاضلاب‌های شهری هستند، برای افزایش و بهبود قابلیت تجزیه پذیری بیولوژیکی آن‌ها، روش‌های مختلف تصفیه شیمیایی برای کاهش سمیت این نوع پساب قبل از اعمال روش‌های تصفیه تکمیلی (مثل روش‌های زیستی) مورد توجه قرار گرفته است (پلاسک[7] و همکاران، ۲۰۲۳). در روش تصفیه بیولوژیکی، به طور طبیعی در اثر فعالیت میکروارگانیسم‌ها، مواد آلی موجود در فاضلاب به دی اکسیدکربن، کربن، آب و بخشی از آن‌ها نیز به ترکیبات معدنی پایدار تجزیه می‌شوند. روش‌های مختلفی برای تصفیه بیولوژیک استفاده می‌شود که به دو گروه کلی تصفیه بی‌هوازی و هوازی تقسیم بندی می‌شوند. روش‌های بیولوژیکی بعلت وجود موجودات زنده در فرآیند، از روش‌های حساس و پر ریسک محسوب می‌شوند اما با توجه به اینکه محصول نهایی یا لجن باقیمانده مواد غیرمضر دوست‌دار محیط زیست محسوب می‌شود و از طرف دیگر هزینه این روش‌ها نسبت به فرآیندهای پیچیده دیگر کمتر محاسبه می‌شود و نیز ایمنی لازم را دارا است (ابو-دالو[8] و همکاران، ۲۰۲۲؛ مانتوس و زاکلیس، ۲۰۲۳)، لذا هدف از این تحقیق کاربردی، بررسی عملکرد فرایندهای تصفیه

[1] Moustafa Fleyfel
[2] Bouigua
[3] Khani
[4] Bharti
[5] Moringa oleifera
[6] Khattabi
[7] Pluschke
[8] Abu-Dalo

شیمیایی (به‌عنوان مرحله اول) و تصفیه بیولوژیک (به‌عنوان مرحله تکمیلی) در کاهش بار آلی فاضلاب خروجی از کارخانه تولید روغن زیتون در نظر گرفته شده است.

مواد و روش‌ها

این تحقیق، در مقیاس آزمایشگاهی در آزمایشگاه پژوهشکده محیط‌زیست جهاد دانشگاهی انجام شد. در این پژوهش، به بررسی کاهش بار آلی فاضلاب واقعی کارخانه تولید روغن زیتون توسط روش‌های تصفیه شیمیایی و بیولوژیکی پرداخته شده است. روش کار بدین صورت است که شرایط مشابه با شرایط تصفیه خانه فاضلاب در پایلوت آزمایشگاهی تصفیه فاضلاب خروجی کارخانه پیاده شود.

نمونه برداری از پساب خروجی یک کارخانه تولید روغن زیتون در استان گیلان انجام شود. تمامی ظروف نمونه برداری نیز، به طور کامل شست و شو و ضد عفونی شد و همچنین با آب مقطر شستشو داده شد. تمامی آزمون‌های شیمیایی با روش استاندارد مطابق با کتاب "روش‌های استاندارد برای آزمایش‌های آب و فاضلاب" انجام گرفت (استاندارد متد، ۲۰۲۶). سپس تجزیه و تحلیل نمونه‌ها با توجه به استانداردهای محیط زیستی انجام شد که در ادامه به آن‌ها پرداخته خواهد شد.

سه منعقد کننده رایج آلوم[1]، پک[2] و کلرید آهن[3] جهت انجام فرآیند تصفیه شیمیایی بکار گرفته شد تا با مقایسه بازده نهایی، بهترین منعقد کننده انتخاب شود. سپس فاضلاب خروجی از تصفیه شیمیایی جهت انجام فرآیندهای بیولوژیکی شامل تصفیه بی هوازی و سپس تصفیه هوازی مورد بررسی قرار گرفت.

فرآیند تصفیه شیمیایی، توسط دستگاه جارتست (مدل زاگ شیمی، ساخت اصفهان، ایران) بر نمونه فاضلاب اعمال شد؛ بعلت ماهیت خاص فاضلاب مورد بررسی و وجود لجن نیمه جامد معلق در فاضلاب، پس از ته نشینی اولیه و صاف کردن فاضلاب با استفاده از فیلتر فلزی (مش) و سپس کاغذ صافی، ابتدا آلوم ppm ۱۰۰۰، به فاضلاب با حجم mL ۲۰۰۰، به منظور انعقاد ذرات بارآلی فاضلاب با دور تند تزریق شد و سپس در دور کند آزمایش جار، از محلول پلی الکترولیت ppm ۲/۵ جهت ته نشینی فلوک‌های تشکیل شده، استفاده شد (خطابی و همکاران، ۲۰۲۲).

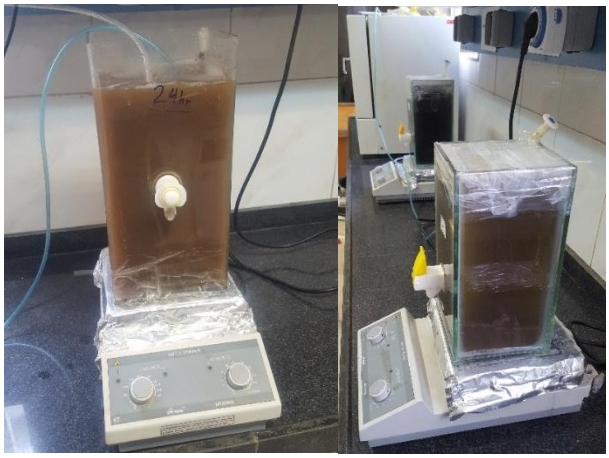
مراحل ذکر شده در فرآیند تصفیه شیمیایی برای ۲ منعقد کننده دیگر با حجم و غلظت ثابت شامل پک (PAC) و کلرید آهن ($FeCl3$) نیز تکرار شد.

پس از پایان فرآیند، جهت بررسی میزان بارآلی باقیمانده در فاضلاب، بر نمونه‌های تصفیه شده توسط هر ۳ منعقد کننده شیمیایی، آزمایش COD[4] انجام شد و فاضلاب تصفیه شده جهت انجام مراحل تصفیه بیولوژیک جداسازی شد (شکل (۱)).

شکل (۱) سمت راست: نمونه فاضلاب بعد از انجام جار تست؛ سمت چپ: نمونه فاضلاب خام

[1] Alum
[2] PAC
[3] $FeCl_3$
[4] Chemical Oxygen Demad

پایلوت‌های بیولوژیک تصفیه خانه فاضلاب (مخزن‌های هوازی و بی‌هوازی) در آزمایشگاه استقرار یافت و این مخزن بوسیله فاضلاب و لجن بارگذاری شد. در تصفیه بیولوژیکی هوازی و بی‌هوازی، نسبت فاضلاب به میکروارگانیسم‌ها (لجن فعال) یک پارامتر کلیدی است که بر بازده فرآیند تصفیه تأثیر می‌گذارد. این نسبت معمولاً با معیار "نسبت غذا به میکروارگانیسم (F/M)" تعیین می‌شود. این نسبت، میزان غذای (آلاینده موجود در فاضلاب) در دسترس برای میکروارگانیسم‌ها را نسبت به توده میکروبی موجود در سیستم نشان می‌دهد؛ در راکتورهای بی‌هوازی و هوازی، این نسبت، بر اساس میزان COD و BOD (تقاضای اکسیژن شیمیایی و بیوشیمیایی) ورودی و حجم راکتور محاسبه می‌شود (ال-سید[1] و همکاران، ۲۰۲۵). در شکل (۲)، راکتورهای بی‌هوازی و هوازی تصفیه بیولوژیک نمایش داده شده است.



شکل (۲) سمت راست: راکتورهای بی‌هوازی، سمت چپ: راکتور هوازی تصفیه فاضلاب کارخانه تولید روغن زیتون

بر این اساس، ۱۰۰۰ mL از حجم راکتورها، به لجن فعال و ۲۵۰۰ mL به فاضلاب اختصاص پیدا کرد. از لجن هاضم هوازی کارخانه تولید نوشیدنی در شهر صنعتی رشت، میکروارگانیسم جهت راکتورهای بیولوژیک تهیه شد.

فرآیند تبدیل میکروارگانیسم‌های هوازی به بی‌هوازی و سازگار شدن با شرایط محیطی و پس از آن کاهش میزان COD در راکتور بی‌هوازی، ۴ ماه به طول انجامید که روند این تغییرات در نمودار اکسل آورده شده است.

وقتی خروجی راکتور بی‌هوازی وارد راکتور هوازی شد، هر روز میزان پارامتر COD مورد سنجش قرار گرفت و تغییرات آن طی یک هفته در نمودار اکسل مورد بررسی قرار گرفت.

یافته‌های پژوهش

در این بخش، مشخصات فاضلاب خام خروجی از کارخانه تولید روغن زیتون، نتایج بدست آمده از بکارگیری ۳ منعقد کننده شیمیایی و نتایج حاصل از راکتورهای بی‌هوازی و هوازی بر فاضلاب مورد بررسی آورده شده است.

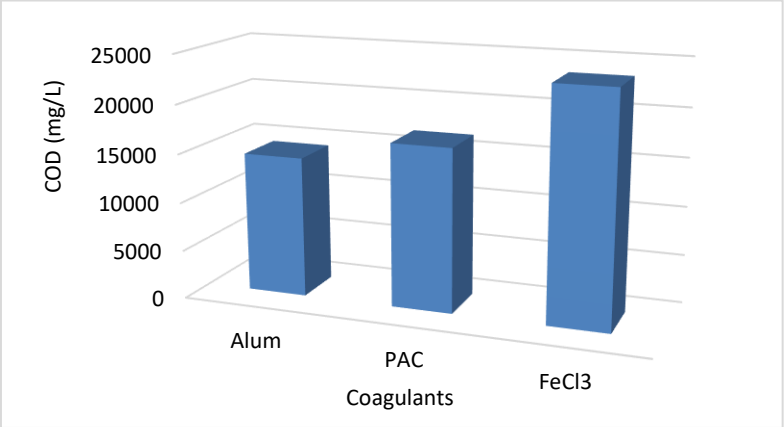
در جدول (۱)، مشخصات فاضلاب خام خروجی از کارخانه تولید روغن زیتون، ارائه شده است.

جدول (۱) مشخصات فاضلاب خام خروجی از کارخانه تولید روغن زیتون

pH	TDS (mg/L)	O&G[2] (mg/L)	BOD_5 (mg/L)	EC[3] (mS)	COD (mg/L)
۵	۱۷۳۰	۳۳/۳۶	۱۷۳۷۰	۲/۷۱	۳۶۳۳۲

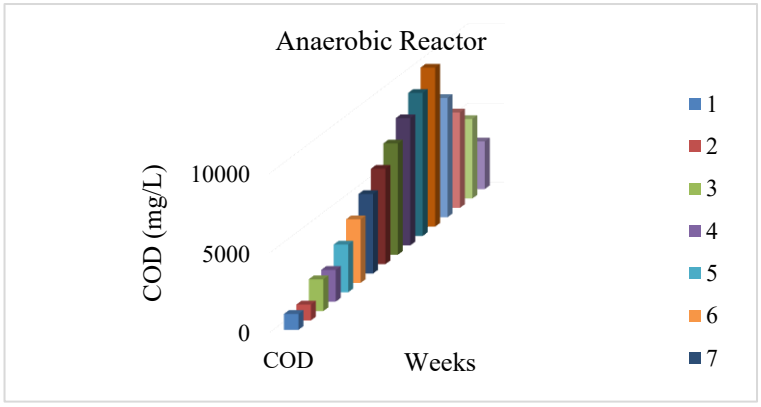
[1] El Sayed
[2] Oil and Grease
[3] Electrical Conductivity

در شکل (۳)، نتایج بدست آمده از فرآیند انعقاد شیمیایی توسط آلوم (Alum)، پک (PAC) و کلرید آهن ($FeCl_3$) بر فاضلاب مورد بررسی نشان داده شده است.



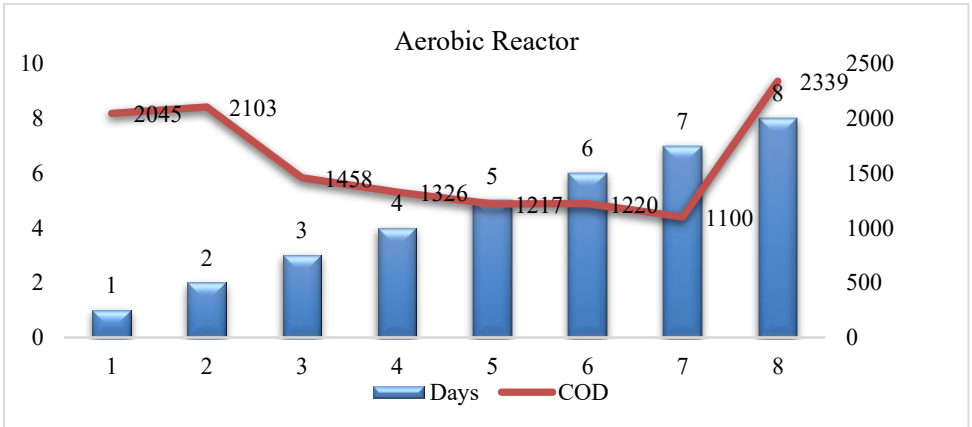
شکل (۳) مقایسه بازده کاهش COD فاضلاب کارخانه تولید روغن زیتون توسط ۳ منعقد کننده شیمیایی مورد بررسی

در شکل (۴)، روند افزایشی و کاهشی میزان بار آلی (COD) در راکتور بی‌هوازی آورده شده است.



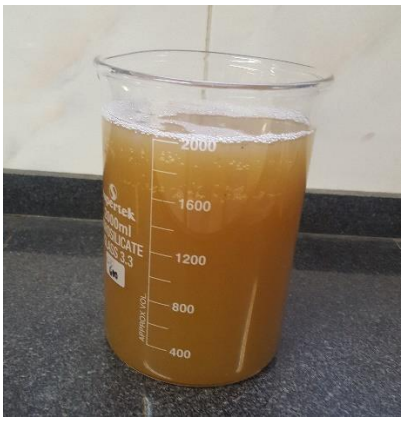
شکل (۴) روند افزایشی و کاهشی میزان بار آلی (COD) در راکتور بی‌هوازی

در شکل (۵)، تغییرات میزان بار آلی (COD) در راکتور هوازی ارائه شده است.



شکل (۵) تأثیر میکروارگانیسم‌های هوازی بر میزان COD فاضلاب کارخانه تولید روغن زیتون

در شکل (۶)، فاضلاب تصفیه شده خروجی از راکتور هوازی نشان داده شده است.



شکل (۶) فاضلاب تصفیه شده خروجی از راکتور هوازی

بحث و نتیجه‌گیری

در این بخش، به تجزیه و تحلیل نتایج بدست آمده از تصفیه شیمیایی و تصفیه بیولوژیکی پرداخته می‌شود.

- بررسی تأثیر عوامل موثر در کاهش بارآلی از فاضلاب کارخانه تولید روغن زیتون با استفاده از منعقدکننده‌های شیمیایی

همان‌طور که در شکل (۳) مشاهده می‌شود، هر ۳ منعقد کننده مورد بررسی با غلظت‌ها و در شرایط برابر با استفاده از دستگاه جارتست به فاضلاب تزریق شدند؛ بر اساس نتایج بدست آمده، منعقدکننده آلوم، با کاهش میزان COD، از میزان mg/L ۳۶۳۳۲ به میزان mg/L ۱۴۴۱۵ (بازده حذف بیش از ۵۰ درصد از بارآلی فاضلاب)، بیشترین تأثیر را در کاهش بار آلی نسبت به ۲ منعقد کننده دیگر داشته؛ بنابراین فاضلاب ورودی به مراحل تصفیه بیولوژیک، توسط این منعقد کننده آماده‌سازی شد (پلندریدو[1] و همکاران، ۲۰۱۴؛ میکولی[2] و همکاران، ۲۰۲۳).

بر اساس مطالعات انجام شده در زمینه بکارگیری فرآیند انعقاد / لخته‌سازی فاضلاب خروجی از کارخانه‌های روغن زیتون با استفاده از منعقدکننده آلوم، کدورت محلول پس از ناپایداری کلوئیدی و تشکیل لخته‌ها کاهش می‌یابد؛ همچنین کاهش ۵۰ درصدی رنگ، کاهش ۷۰ درصدی مواد معدنی و کاهش ۵۰ درصدی سرب و آهن در فاضلاب تصفیه شده مشاهده شده است (جیا[3] و همکاران، ۲۰۲۴؛ واز[4] و همکاران، ۲۰۲۴).

به دلیل اسیدی بودن فاضلاب مورد آزمایش، در فرآیند دور تند جارتست، از محلول آهک ppm ۲۵۰، به همراه هر ۳ منعقد کننده استفاده شد. افزودن آهک باعث افزایش خاصیت قلیایی فاضلاب و تنظیم pH فاضلاب خروجی می‌شود این مکانیزم برای فرآیندهای انعقاد نیز مفید است زیرا می‌تواند منجر به خنثی‌سازی ذرات کلوئیدی با بار منفی شود، جذب بین بارهای مخالف هم منجر به تجمع ذرات و تشکیل خوشه‌های بزرگ‌تر به نام فلوک[5] می‌شود (مصطفی فلیفل[6] و همکاران، ۲۰۲۴؛ بوهیا[7] و همکاران، ۲۰۲۳).

[1] Pelendridou
[2] Micoli
[3] Jyia
[4] Vaz
[5] flocs
[6] Moustafa Fleyfel
[7] Bouhia

همچنین، یافته‌ها نشان دادند که آهک می‌تواند یون‌های کلسیم، فسفر و جامدات معلق را نیز از فاضلاب حذف کند (الاسمار[1]، ۲۰۰۶؛ آچاک[2] و همکاران، ۲۰۲۳).

از طرفی دیگر، آهک فعال یک منعقد کننده موثر است که با ترکیب نمک‌های آلومینیوم (آلوم) به ماتریکس کربنات کلسیم تبدیل می‌شود تا توانایی انعقاد آن را افزایش داده و آلاینده‌های مختلف فاضلاب را به‌طور موثر حذف کند (سینق[3] و همکاران، ۲۰۲۰؛ ال-شاهاوی[4] و همکاران، ۲۰۲۱).

علت به‌کار گرفتن روش تصفیه بیولوژیک در مرحله تصفیه ثانویه، ماهیت فاضلاب و میزان بالای مواد آلی آن و عدم احراز شرایط تخلیه به محیط پذیرنده یا تصفیه خانه فاضلاب شهری براساس استاندارد سازمان حفاظت محیط زیست بعد از تصفیه اولیه است. از طرف دیگر، مطالعات مختلف نشان داده‌اند که پساب‌های خروجی از کارخانه‌های تولید روغن زیتون به دلیل وجود ترکیبات فنولی که از رشد میکروارگانیسم‌ها ممانعت به‌عمل می‌آورند، قابلیت تجزیه بیولوژیکی با روش‌های متداول را ندارند؛ بنابراین، باید قبل از تصفیه بیولوژیک، حلقه‌های بنزنی این آلاینده‌ها شکسته شود و سپس وارد مرحله تکمیلی بیولوژیک شوند. که تصفیه شیمیایی به‌عنوان تصفیه اولیه قابلیت تحقق این هدف را دارد (خانی[5] و همکاران، ۲۰۱۹؛ ال- موسائو[6] و همکاران، ۲۰۲۲).

از مهمترین بخش‌های مدل‌سازی تصفیه بیولوژیک، فرآیند انطباق میکروارگانیسم‌های لجن فعال با شرایط محیط حاضر است. به منظور انجام مراحل تصفیه بیولوژیک، با توجه به دامنه تحمل بالاتر میکروب‌های بی‌هوازی در مقابل بار آلی فاضلاب در مقایسه با میکروب‌های هوازی، ابتدا از روش بی‌هوازی و میکروارگانیسم‌های مرتبط استفاده شد (گونک[7] و همکاران، ۲۰۱۲؛ جمراه[8] و همکاران، ۲۰۲۵).

همان‌طور که ذکر شد، میکروارگانیسم‌های تهیه شده از ابتدا هوازی بودند که برای راکتور بی‌هوازی نیز از همان میکروارگانیسم‌ها و با تبدیل آنها به حالت بی‌هوازی استفاده شد. میزان MLSS لجن در ورود به راکتور بی‌هوازی، ۱۰۷۱۶ mg/L اندازه‌گیری شد. جهت آداپته شدن میکروارگانیسم‌ها، به تدریج میزان COD فاضلاب در راکتور بی‌هوازی، در ماه اول، هر ۲ هفته و در ماه دوم هر هفته به میزان ۱۰۰۰ mg/L افزایش پیدا کرد تا به ۱۰۰۰۰ mg/L رسید؛ سپس میزان Feed دهی متوقف شد و بعد از آن، پارامتر COD شروع به کاهش کرد؛ زیرا میکروارگانیسم‌ها بعد از طی شدن روند انطباق، بارآلی فاضلاب را بعنوان منبع غذایی مورد مصرف قرار دادند (فهمی[9] و همکاران، ۲۰۲۶؛ فلیفل و همکاران، ۲۰۲۴).

زمانی‌که COD به میزان ۳۰۰۰ mg/L رسید، فاضلاب جهت ورود به راکتور هوازی آماده شد؛ همان‌طور که در شکل (۴) نشان داده شده، برای پروسه بی‌هوازی ۴ ماه زمان صرف شد. وقتی خروجی راکتور بی‌هوازی با میزان ۳۰۰۰ mg/L وارد راکتور هوازی شد، همان‌طور که در شکل (۵) نشان داده شده، در ابتدا روند کاهش COD با تغییرات اندک و تقریباً ثابت بوده اما با گذشت زمان و انطباق سریع‌تر میکروارگانیسم‌های هوازی با شرایط، روند کاهش این پارامتر سرعت گرفت و در روز هفتم به ۱۱۰۰ mg/L رسید، در این روز میزان MLSS لجن هوازی ۲۳۵۸ mg/L اندازه‌گیری شد. اما بعد از روز هفتم به دلیل کاهش میزان MLSS و در نتیجه کاهش تعداد میکروارگانیسم‌ها، میزان COD افزایش پیدا کرد و به ۲۳۳۹ mg/L رسید (فهمی و همکاران، ۲۰۲۶؛ بارانسی-کرکابی[10] و همکاران، ۲۰۲۵؛ جمراه و همکاران، ۲۰۲۳).

[1] Al-Asmar
[2] Achak
[3] Singh
[4] El Shahawy
[5] Khani
[6] Moussaoui
[7] Gonçalves
[8] Jamrah
[9] Fahrni
[10] Baransi-Karkaby

در تحقیقات انجام شده مشابه نیز، تخریب هوازی منجر به حذف بار آلی بیشتر نمونه‌هایی شد که با الکترود یا منعقد کننده آلومنیوم پیش تیمار شده بودند. میکروارگانیسم‌های هوازی با ترشح آنزیم‌های خارج سلولی اکسیداتیو، فنول‌های محلول را به شکل‌های پلیمری نامحلول تبدیل می‌کنند. این نتایج هم افزایی بین فرآیندهای شیمیایی و زیستی را برجسته می‌کند؛ سیستم شیمیایی سمیت پساب را کاهش می‌دهد و زیست فراهمی سوبسترا را افزایش می‌دهد و سیستم بیولوژیک تخریب ترکیبات آروماتیک را کامل می‌کند (فهرنی و همکاران، ۲۰۲۶؛ بارانسی-کرکابی و همکاران، ۲۰۲۵؛ بوئیگا و همکاران، ۲۰۲۴).

فاضلاب خروجی از کارخانه روغنکشی زیتون در جریان تولید، به دلیل شوری بالا و ترکیب پلی فنلی پیچیده و زیست تخریب پذیری پایین در بین فاضلاب‌های کشاورزی و صنعتی در رتبه اول قرار دارد و حتی به لحاظ ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی نیز متغیر است (صلاح سوابی[1]، ۲۰۲۴).

تلفیق موفق فرآیند انعقاد / لخته‌سازی به عنوان یک روش اقتصادی تصفیه فاضلاب و به‌عنوان پیش تیمار، با فرآیند تصفیه بیولوژیکی که عوامل سمی فاضلاب‌های خروجی از کارخانه تولید روغن زیتون را حذف می‌کند در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفت. انجام این تحقیقات گامی مهم در جهت حفظ محیط‌زیست و حوزه‌های آبخیز خواهد بود.

بر اساس نتایج تحقیق حاضر، با کاهش بار آلی فاضلاب خروجی نهایی از سیستم تصفیه و رساندن آن از حدود ۳۶۰۰۰ mg/L به ۱۱۰۰ mg/L، امکان ورود به سیستم تصفیه فاضلاب شهری و در نتیجه تصفیه نهایی و تخلیه امن آن به محیط‌های پذیرنده بر اساس استاندارد سازمان حفاظت محیط زیست میسر شده است.

به‌عنوان پیشنهاد برای تحقیقات آتی، می‌توان در مرحله آخر، از فرآیند ازن زنی هم استفاده کرد؛ این فرآیند مناسب مطالعات تکمیلی آزمایشگاهی است اما به‌علت هزینه بالای این روش، در مقیاس صنعتی توجیه اقتصادی ندارد؛ زیرا، علاوه بر پیچیدگی عملیاتی این روش مانند نیاز به اپراتور ماهر برای راه‌اندازی و نگهداری سیستم، هزینه سرمایه‌گذاری اولیه برای تجهیزات تولید و تزریق ازن (ازن‌ژنراتورها) و همچنین هزینه عملیاتی (مصرف برق) آن بالا است. همچنین، ازن عمر کوتاهی در آب دارد و خاصیت گندزدایی پایدار مانند کلر را ندارد؛ بنابراین، ممکن است نیاز به یک مرحله گندزدایی تکمیلی (مانند کلرزنی یا UV) باشد.

سپاسگزاری

از پژوهشکده محیط زیست جهاد دانشگاهی، برای همکاری در انجام پژوهش حاضر و استفاده از امکانات آزمایشگاهی، سپاسگزاریم. همچنین از خانم‌ها دکتر استوار و دکتر توکلی که در پیشبرد آزمایش‌ها همکاری داشتند، قدردانی می‌شود.

منابع

Abu-Dalo, M., Abdelnabi, J., Al-Rawashdeh, N. A., Albiss, B., & Al Bawab, A. (2022). Coupling coagulation-flocculation to volcanic tuff-magnetite nanoparticles adsorption for olive mill wastewater treatment. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management, 15*, 100416.

Achak, M., et al. (2023). Performance of olive mill wastewater treatment using hybrid system combining sand filtration and vertical flow constructed wetlands. *Journal of Water Process Engineering*, *53*, 103737.

Al-Asmar, A. (2006). Impact of some industrial activities on the surrounding environment, Damietta, Egypt [Doctoral dissertation, Mansoura University].

American Public Health Association, American Water Works Association, & Water Environment Federation. (2026). Standard methods for the examination of water and wastewater.

Baransi-Karkaby, K., Hassanin, M., Raanan-Kiperwas, H., Massalha, N., & Sabbah, S. (2025). Methane production from anaerobic pre-treatment of municipal wastewater combined with olive mill wastewater: A demonstration study. Water Science & Technology, 91 (2), 126–2025.

[1] Salah Souabi

Bharti, M., Das, P. P., & Purkait, M. K. (2023). A review on the treatment of water and wastewater by electrocoagulation process: advances and emerging applications. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, *11*(6), 111558.

Bouhia, Y., Hafidi, M., Ouhdouch, Y., & Lyamlouli, K. (2023). Olive mill waste sludge: from permanent pollution to a highly beneficial organic biofertilizer: a critical review and future perspectives. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, *259*, 114997.

Bouigua, H., Bakali, R., Jaber, H., El Kabous, K., Choukri, S., Elyachioui, M., & Ouhssine, M. (2024). A remarkable step in the aerobic biological treatment of Olive Mill Wastewater (OMW): A combination of selected microbial strains that enhance their decolorization and depollution.

Bouyakhsass, R., Souabi, S., Khattabi, S., Taleb, A., & Pala, A. (2023). Optimization of coagulation-flocculation for landfill leachate treatment: An experimental design approach using response surface methodology. Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management, 20, 100841.

El Moussaoui, T. (2022). Studies on the activated sludge process crucial parameters controlling olive mill wastewater treatment. *Science of The Total Environment*, *838*, 156455.

El Sayed, A., Ismail, A., Rabii, A., Hamze, A., Hamza, R. A., & Elbeshbishy, E. (2025). Biochemical Methane Production Potential of Different Industrial Wastes: The Impact of the Food-to-Microorganism (F/M) Ratio. Processes, 13(3), 802.

El Shahawy, A., Ahmed, I. A., Nasr, M., Ragab, A. H., AI-Mhyawi, S. R., & Elamin, K. M. A. (2021). Organic pollutants removal from olive mill wastewater using electrocoagulation process via Central composite design (CCD). *Water*, *13*(24), 3522.

Fahrni, M. S., Bellouk, H., El Harchli, G. H., El Mahjoub, A., El Khammar, F., Chaouch, A., & Khalil, F. (2026). Sequential electrocoagulation-Fungal biotreatment as a pretreatment approach for olive mill wastewater (Fez, Morocco). Scientific African, 31, e03241.

Fleyfel, L. M., et al. (2024). Effects of extraction processes on the physicochemical characteristics and phenolic compound content of olive mill wastewater: a comparative study. *Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration*, *10*(3), 1961-1975.

Fleyfel, L. M., Matta, M., Sayegh, N. F., & El Najjar, N. H. (2024). Olive mill wastewater treatment using coagulation/flocculation and filtration processes. Heliyon, 10 (4), e40348.

Gonçalves, M. R., Costa, J. C., Marques, I. P., & Alves, M. M. (2012). Strategies for lipids and phenolics degradation in the anaerobic treatment of olive mill wastewater. Water Research, 46 (5), 1684–1692.

Haddaji, C., Ennaciri, K., Driouich, A., Digua, K., & Souabi, S. (2022). Optimization of the coagulation–flocculation process for vegetable oil refinery wastewater using a full factorial design. Process Safety and Environmental Protection, 160, 803–816.

Jamrah, A., AI-Zghoul, T. M., & Darwish, M. M. (2023). A comprehensive review of combined processes for olive mill wastewater treatments. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, *8*, 100493.

Jamrah, A., Al-Zghoul, T. M., AI-Qodah, Z., & Al-Karablieh, E. (2025). Performance of combined Olive Mills wastewater treatment system: electrocoagulation-assisted adsorption as a post polishing sustainable process. *Water*, *17*(11), 1697.

Jyia, H., Mohssine, A., Belouafa, S., & EL Harfaoui, S. (2024). Modeling and optimization of olive mill wastewater dephenolization by a process combining coagulation and advanced oxidation using an activated lime coagulant and hydrogen peroxide. *Heliyon, 10*(4), e100929.

Khani, MR. Mahvi, AH. Zazouli, MA. Yousefi, Z. Dadban Shahamat, Y. (2019). Investigating the treatment and mineralization of olive oil mill wastewater by using electrocoagulation and novel various advanced oxidations: a kinetic study. Iranian Journal of Health and Environment;12(1):47-62.

Koutsos, T. M., Chatzistathis, T., & Balampekou, E. I. (2018). A new framework proposal, towards a common EU agricultural policy, with the best sustainable practices for the re-use of olive mill wastewater. Science of the Total Environment, 622–623, 42–953.

Manthos, G., Zagklis, D., Papavasileiou, V., Gkountou, N. A., Saita, Z., Zafiri, C., & Kornaros, M. (2023). High-rate upflow anaerobic sludge blanket bioreactor for the treatment of olive mill effluents: Laboratory and pilot scale systems investigation. Renewable Energy, 217, 119215.

Micoli, L., Di Rauso Simeone, G., Turco, M., Toscano, G., & Rao, M. A. (2023). Anaerobic digestion of olive mill wastewater in the presence of biochar. *Energy*, *16*(7), 3259.

Mohssine, A., Zmirli, Z., El, S., Belouafa, S., Sallek, B., & Chaair, H. (2023). Wastewater remediation using multi-soil layering (MSL) Eco-technology: A comprehensive and critical review. Process Safety and Environmental Protection, 178 (September), 1045–1082.

Pelendridou, K., Michailides, M. K., Zagklis, D. P., Tekerlekopoulou, A. G., Paraskeva, C. A., & Vayenas, D. V. (2014). Treatment of olive mill wastewater using a coagulation–flocculation process either as a single step or as post-treatment after aerobic biological treatment. Journal of Chemical Technology and Biotechnology, 89 (12), 1866–1874.

Pluschke, J., Faßlrinner, K., Hadrich, F., Loukil, S., Chamkha, M., Geißen, S.-U., & Sayadi, S. (2023). Anaerobic Digestion of Olive Mill Wastewater and Process Derivatives—Biomethane Potential, Operation of a Continuous Fixed Bed Digester, and Germination Index. Applied Sciences, 13(17), 9613.

Salah Souabi, A. A. (2023). *Wastewater from Olive Oil Production*. Springer International Publishing.

Singh, S. K., Singh, A., Singh, B., & Vashistha, P. (2020). Application of thermo-chemically activated lime sludge in production of sustainable low clinker cementitious binders. Journal of Cleaner Production, 264, 121570.

Turna, T., & Yıldız, Y. (2024). Treatment of vegetable oil industry wastewaters with coagulation–flocculation methods. Düzce University Journal of Science and Technology, 15(2), 533–540.

Vaz, T., Quina, M. M. J., Martins, R. C., & Gomes, J. (2024). Olive mill wastewater treatment strategies to obtain quality water for irrigation: a review. *Science of The Total Environment*, *931*, 172676.

Zhao, C., Zhou, J., Yan, Y., Yang, L., Xing, G., Li, H., Wu, P., Wang, M., & Zheng, H. (2021). Application of coagulation/flocculation in oily wastewater treatment: A review. Science of the Total Environment, 765, 142795.