

بررسی تصفیه پذیری آب خاکستری بوسیله اکسیداسیون با ازن و کربن فعال

سعید گواهی^۱، احسان دریگوند^{۲*}، صائب خوشنواز^۳، محسن سلیمانی بابرصاد^۴، ایمان پارسه^۵

۱- دانشجوی دکتری گروه عمران، واحد شوشتر، دانشگاه آزاد اسلامی، شوشتر، ایران.

۲- استادیار، گروه مهندسی آب، مرکز تحقیقات علوم آب و محیط زیست، واحد شوشتر، دانشگاه آزاد اسلامی، شوشتر، ایران
(نویسنده مسئول) (ایمیل ederikvand@yahoo.com)

۳- استادیار، گروه مهندسی آب، مرکز تحقیقات علوم آب و محیط زیست، واحد شوشتر، دانشگاه آزاد اسلامی، شوشتر، ایران

۴- استادیار، گروه مهندسی آب، مرکز تحقیقات علوم آب و محیط زیست، واحد شوشتر، دانشگاه آزاد اسلامی، شوشتر، ایران

۵- استادیار، گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده علوم پزشکی بهبهان، بهبهان، ایران

چکیده

این تحقیق تأثیر هم‌افزایی کربن فعال در حذف ترکیبات آلی از آب خاکستری را از طریق فرآیند ازن‌زنی بررسی کرده و شرایط بهینه را شناسایی می‌کند. نمونه‌های آب خاکستری از ماشین لباسشویی، دوش و سینک‌ها جمع‌آوری و تحلیل شدند که شامل پارامترهایی همچون pH ، COD ، BOD ، TKN ، TP و سورفکتانت‌ها بود. نمونه‌ها در غلظت‌های مختلف ازن و زمان‌های تماس مختلف تحت اکسیداسیون شیمیایی با ازن قرار گرفتند. شرایط بهینه برای حذف COD به مقدار ۲٫۵ میلی گرم بر لیتر ازن و ۶۰ دقیقه زمان تماس با کاهش ۶۰ درصدی COD تعیین شد. مطالعه نشان داد که افزودن کربن فعال دانه‌ای تولید رادیکال‌های هیدروکسیل را به‌ویژه در دوزهای پایین ازن به‌طور قابل توجهی افزایش می‌دهد. غلظت‌های GAC تا ۱٫۵ گرم بر لیتر باعث بهبود راندمان حذف COD ، BOD ، TKN ، TP و سورفکتانت‌ها شدند، با بیشترین کاهش در دوزهای خاص مشاهده شد. ترکیب استفاده از ازن و GAC تا ۷۵ درصد حذف COD را به همراه داشت که کارایی روش‌های تصفیه ترکیبی را نشان می‌دهد. این نتایج با یافته‌های پیشین همخوانی دارد و نقش مؤثر سیستم‌های ترکیبی در بهبود کیفیت آب خاکستری را تأیید می‌کند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که استفاده همزمان از کربن فعال و ازن‌زنی

می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی کارایی حذف آلاینده‌ها را افزایش دهد و به استراتژی‌های بازاستفاده مؤثرتر آب کمک کند.

کلمات کلیدی: آب خاکستری، کربن فعال، هم‌افزایی، آلی، اکسیداسیون شیمیایی

(۱) مقدمه

کمبود آب یک چالش جهانی رو به رشد است که عوامل مختلفی از جمله افزایش جمعیت، شهرنشینی و تغییرات آب و هوایی آن را تشدید می‌کند. با افزایش تقاضا برای آب شیرین، ضرورت شیوه‌های مدیریت پایدار آب بیش از پیش احساس می‌شود. یکی از رویکردهای امیدوارکننده برای مقابله با این مسئله، تصفیه و استفاده مجدد از آب خاکستری - فاضلاب ناشی از فعالیت‌های خانگی مانند حمام کردن، شستن ظروف و لباسشویی است. برخلاف آب سیاه که حاوی غلظت قابل‌توجهی از فاضلاب آلی توالست، آب خاکستری بار آلودگی کمتری دارد و بنابراین گزینه جذابی برای تصفیه و استفاده مجدد به شمار می‌رود.

روش‌های سنتی تصفیه آب خاکستری شامل فرآیندهای فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی است که هر کدام محدودیت‌های خاص خود را دارد. روش‌های فیزیکی مانند فیلتراسیون اغلب برای حذف آلاینده‌های آلی محلول کافی نیستند، در حالی که روش‌های شیمیایی ممکن است شامل استفاده از مواد شیمیایی مضر باشند. تصفیه‌های بیولوژیکی گرچه موثر هستند، اما می‌توانند زمان بر بوده و نیاز به فضای قابل‌توجه و نگهداری داشته باشند. این چالش‌ها محققان را بر آن داشته تا فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته (AOP) را به عنوان یک جایگزین مؤثرتر بررسی کنند.

فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته، به ویژه آنهایی که شامل ازن (O_3) و کربن فعال هستند، در کاربردهای تصفیه آب پتانسیل بالایی نشان داده‌اند. ازن سازی یک روش اکسیداسیون قدرتمند است که می‌تواند طیف وسیعی از آلاینده‌های آلی، عوامل بیماری‌زا و میکروارگانیسم‌ها را تجزیه کند. ازن محلول در آب، رادیکال‌های هیدروکسیل (OH) تولید می‌کند که بسیار واکنش‌پذیر بوده و قادر به تجزیه آلاینده‌های پیچیده به مولکول‌های ساده‌تر و کم‌ضررتر هستند.

از طرف دیگر، کربن فعال به دلیل ظرفیت جذب بالا شناخته شده است. این ماده می تواند به طور موثر انواع آلاینده ها از جمله ترکیبات آلی، کلر و حتی برخی فلزات سنگین را از آب حذف کند. استفاده از کربن فعال در تصفیه آب به خوبی جا افتاده است و ترکیب آن با ازن سازی می تواند به طور بالقوه کارایی کلی فرآیند تصفیه را افزایش دهد.

استفاده همزمان از کربن فعال و ازن سازی بر نقاط قوت هر دو روش تکیه می کند. ازن می تواند آلاینده ها را اکسید و تجزیه کند، در حالی که کربن فعال می تواند محصولات جانبی حاصل و هر گونه آلاینده باقی مانده را جذب کند. این رویکرد هم افزا نه تنها کارایی حذف آلاینده ها را بهبود می بخشد، بلکه برخی از محدودیت های مرتبط با هر روش را در صورت استفاده مستقل، کاهش می دهد.

ازن زنی و جذب بر روی کربن فعال در حذف میکروآلاینده ها، به ویژه محصولات مراقبت شخصی از آب خاکستری تصفیه شده هوازی، موثر تلقی شده است. این ترکیب طیف وسیعی از آلاینده ها را هدف قرار می دهد که ممکن است با روش های تصفیه متداول به طور کامل حذف نشوند. مکانیسم های تکمیلی ازن ترکیبات آلی را اکسید می کند و آنها را به مولکول های کوچکتر و قابل تجزیه زیستی بیشتر تجزیه می کند. سپس کربن فعال این محصولات جانبی و همچنین سایر ترکیبات آلی را جذب می کند و فرآیند تصفیه جامع تری را ایجاد می کند (هرناندز و همکاران، ۲۰۱۱). فرآیند ترکیبی کارایی بالایی در حذف مواد آلی نشان می دهد. برای مثال، در مطالعه ای با استفاده از ازن زنی، کربن فعال دانه ای (GAC) و اولترافیلتراسیون، میانگین حذف تقاضای اکسیژن شیمیایی (COD) برای انواع مختلف آب خاکستری از ۳.۷۷ درصد تا ۳.۹۷ درصد متغیر بود. نرخ حذف BOD5 را بین ۷.۴۲٪ تا ۸.۸۶٪ گزارش کرد که نشان دهنده توانایی سیستم برای کاهش قابل توجه ترکیبات آلی قابل تجزیه زیستی است. اثر هم افزایی ازن و کربن فعال، به ویژه در ترکیب با اولترافیلتراسیون، منجر به حذف عالی کدورت با نرخ هایی به طور مداوم بالای ۹۵ درصد شد. سولفونات های آلکیل بنزن خطی (LAS)، مواد شوینده رایج در آب خاکستری، با نرخ هایی بین ۳.۸۸٪ تا ۹.۹۱٪ به طور موثر حذف شدند فرآیند ترکیبی در تصفیه آب خاکستری مصنوعی با بارهای آلی مختلف (کم، متوسط و زیاد) و همچنین آب خاکستری واقعی، نشان داده است که تطبیق پذیری بالایی دارد (شهسوانی و همکاران، ۲۰۱۱). ازن زنی و جذب بر روی کربن فعال، تکنیک های بسیار مؤثری برای کاهش بار ریزآلاینده ها از فاضلاب با هزینه ای قابل قبول ۰.۵۰ تا ۲۰.۰ یورو بر متر مکعب هستند (یوس و همکاران، ۲۰۰۸)

این مقاله استدلال می کند که استفاده همزمان از کربن فعال و ازن سازی می تواند به طور قابل توجهی کارایی حذف آلاینده ها از آب خاکستری را افزایش دهد و در نتیجه به استراتژی های موثرتر استفاده مجدد از آب کمک کند. با ادغام این دو روش قدرتمند تصفیه، دستیابی به سطوح بالاتر تصفیه و اطمینان از اینکه آب خاکستری تصفیه شده مطابق با استانداردهای کیفیت لازم برای استفاده مجدد ایمن باشد، امکان پذیر است. این رویکرد نه تنها به نیاز فوری برای مدیریت پایدار آب پاسخ می دهد، بلکه راه حل مناسبی برای کاهش کمبود آب در مناطق مختلف جهان ارائه می دهد.

۲) روش کار

۲-۱) جمع آوری نمونه های آب خاکستری

نمونه های آب خاکستری خانگی از منابعی مانند ماشین لباسشویی، دوش و سینک های شستشو جمع آوری می شوند. برای هر آزمایش حدود ۱۰ لیتر نمونه نیاز است. برای جلوگیری از آلودگی خارجی، نمونه ها در ظروف پلاستیکی تمیز و ضد عفونی شده با درب محکم جمع آوری می شوند. آزمایشگاه باید به خوبی تهویه شده و دارای تجهیزات ایمنی مانند هود شیمیایی، دستکش، عینک و ماسک باشد. تمامی دستگاه ها از جمله ازن ژنراتور، pH متر، اسپکتروفتومتر و توربیدومتر باید کالیبره و آماده استفاده باشند.

۲-۲) مشخصات فاضلاب مورد مطالعه

فاضلاب مورد مطالعه از ماشین لباسشویی، دوش و سینک های شستشو جمع آوری می شود. طبق جدول (۱) این فاضلاب دارای ویژگی هایی از قبیل pH بین ۶,۵ تا ۸,۵، COD برابر ۱۷۰ میلی گرم بر لیتر، BOD برابر ۴۰ میلی گرم بر لیتر است.

جدول (۱) خصوصیات آب خاکستری آزمایشگاهی

مقدار	واحد	ترکیب
۴۰	Mg/l	BOD5
۱۷۰	Mg/l	COD

TKN	Mg/l	۳,۹
TP	Mg/l	۰,۴
سورفکتانت	Mg/l	۱۰

۲-۳) مشخصات دستگاه ازن زنی

مدل **A2Z Ozone Aqua-8** با ظرفیت تولید ازن، ۸۰۰ میلی گرم در ساعت، نوع تولید ازن به صورت تخلیه کرونا (**Corona Discharge**)، منبع تغذیه ۱۱۰ ولت با فرکانس ۶۰ هرتز با ابعاد ۱۱,۳*۸*۳,۲ اینچ و وزن ۲,۷ کیلوگرم می باشد.

۲-۴) فرآیند اکسیداسیون

ابتدا نمونه‌های آب خاکستری از طریق فیلتر کاغذی برای حذف ذرات معلق بزرگ عبور داده می‌شوند. سپس نمونه‌ها به چند بخش تقسیم می‌شوند تا تأثیر غلظت‌های مختلف ازن و زمان‌های مختلف واکنش بررسی شود. **pH** نمونه‌ها با استفاده از محلول‌های اسیدی یاقلیایی به محدوده مطلوب تنظیم می‌شود. برای کاهش **pH** از محلول اسیدی **H2SO4** و برای افزایش **pH** از محلول بازی **NaOH** استفاده می‌شود. دمای اولیه نمونه‌ها اندازه‌گیری و ثبت می‌شود و در صورت نیاز، از حمام آب برای تنظیم دما استفاده می‌شود.

۲-۵) تزریق ازن

نمونه‌ها در راکتور بسته قرار داده می‌شوند و دستگاه ازن ژنراتور به راکتور متصل می‌شود. میزان ازن تولیدی به صورت دقیق تنظیم می‌شود (۱، ۳ و ۵ میلی گرم در لیتر) و زمان تزریق و غلظت ازن ثبت می‌شود. نمونه‌برداری در فواصل زمانی معین (مثلاً هر ۱۰ دقیقه) انجام شده و پارامترهای مختلفی مانند **pH**، دما و غلظت ازن اندازه‌گیری و ثبت می‌شوند.

۲-۶) اندازه‌گیری پارامترهای کیفی

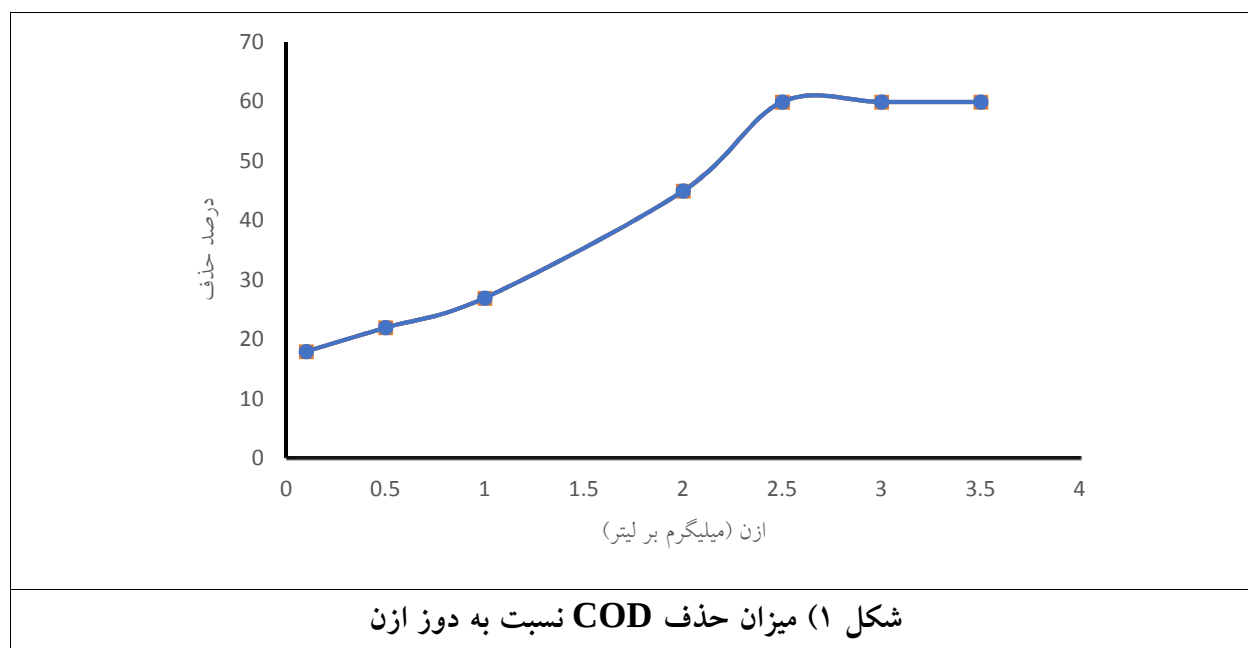
pH نمونه‌ها قبل و بعد از تزریق ازن با استفاده از دستگاه **pH** متر که با محلول‌های استاندارد کالیبره شده است، اندازه‌گیری می‌شود. کدورت نمونه‌ها با دستگاه توربیدیمتر کالیبره شده اندازه‌گیری می‌شود **COD** و

BOD نمونه‌ها با استفاده از اسپکتروفتومتر و معرف‌های مورد نیاز اندازه‌گیری می‌شود. غلظت ازن باقی‌مانده در آب با استفاده از معرف‌های شیمیایی و اسپکتروفتومتر تعیین می‌شود. ترکیبات آلی فرار با استفاده از دستگاه GC-MS شناسایی و اندازه‌گیری می‌شوند.

(۳) نتایج:

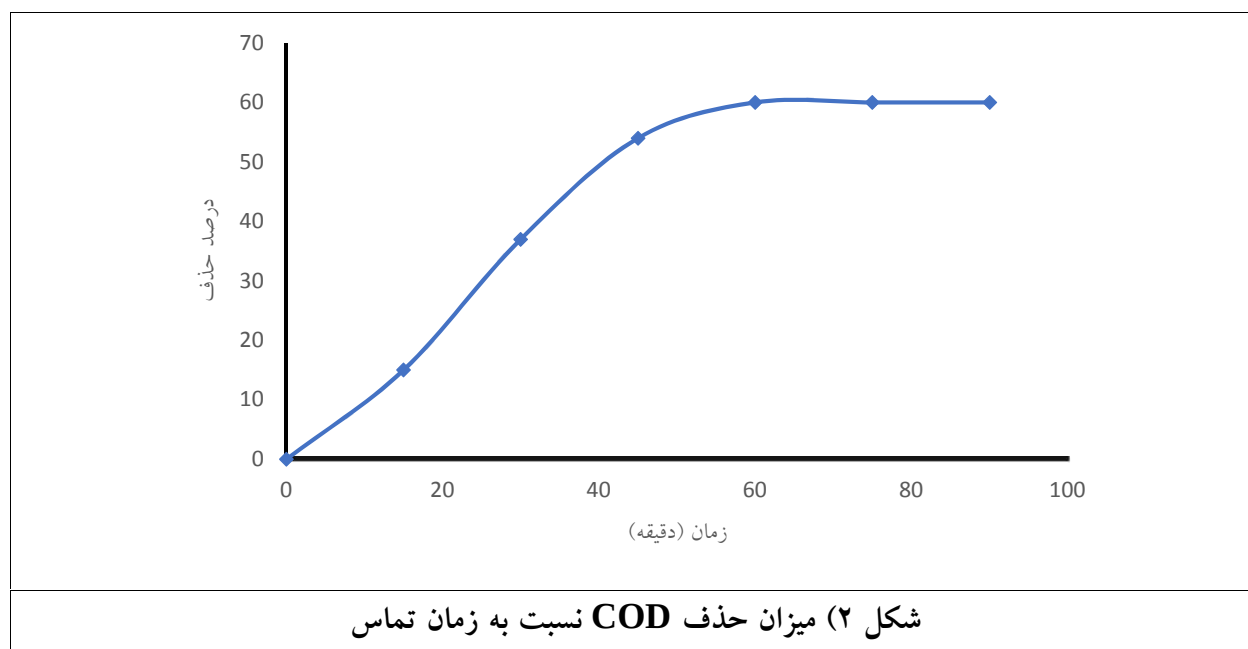
۳-۱) حذف ترکیبات آلی بوسیله اکسیداسیون با ازن

آب خاکستری با $COD=170 \text{ mg/l}$ به صورت راکتور بسته با دوزهای ۰,۵ تا ۴ میلی گرم بر لیتر ازن و زمان تماس ۲۰ تا ۸۰ دقیقه در $pH=9$ و زمان ۶۰ دقیقه تحت اکسیداسیون شیمیایی قرار می‌گیرد. همانگونه که در شکل ۱ و ۲ مشاهده می‌شود افزایش ازن و زمان تماس بیشتر از ۲,۵ میلی گرم بر لیتر و ۶۰ دقیقه نمی‌تواند راندمان را از ۶۰ درصد بیشتر کند. بنابراین مقدار ۲,۵ میلی گرم بر لیتر ازن و زمان تماس ۶۰ دقیقه به عنوان شرایط بهینه انتخاب می‌گردد.



یافته‌های تحقیق با یانگ مطابقت دارد که در آن شرایط بهینه برای حذف COD، ۷,۸۶ میلی گرم در لیتر ازن و ۳۰ دقیقه زمان تماس در $pH=9$ بود که به نرخ حذف ۳۷,۸ درصد رسید (یانگ و همکاران، ۲۰۱۳). آلکسیو

کارایی حذف ترکیبات آلی را برای فاضلاب صنعتی را با ۲,۵ میلی گرم در لیتر ازن و زمان تماس ۶۰ دقیقه ۶۰ درصد افزایش می دهد (الکسیو و همکاران، ۲۰۱۸).



۲-۳) نقش کربن فعال در افزایش غلظت رادیکال‌های هیدروکسیل (OH)

همانطور که در جدول (۳) مشاهده می‌شود، با افزایش غلظت GAC، تولید رادیکال هیدروکسیل در تمام دوزهای ازن به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. این افزایش در دوزهای پایین ازن (۰,۵ و ۱ میلی گرم در لیتر) بیشتر مشهود است. به عنوان مثال، در دوز ۰,۵ میلی گرم در لیتر ازن، افزایش غلظت GAC از ۰ به ۳ گرم در لیتر، منجر به افزایش ۷۸ درصدی تولید رادیکال هیدروکسیل می‌شود.

جدول (۳) نقش کربن فعال در تولید هیدروکسیل هنگام اکسیداسیون شیمیایی ازن در آب

تولید هیدروکسیل در دوز ۲,۵ ازن (mg/L))	تولید هیدروکسیل در دوز ۲ ازن (mg/L))	تولید هیدروکسیل در دوز ۱,۵ ازن (mg/L))	تولید هیدروکسیل در دوز ۱ ازن (mg/L))	تولید هیدروکسیل در دوز ۰,۵ ازن (mg/L))	دوز (GAC گرم بر لیتر)
۲,۵	۲	۱,۵	۱	۰,۵	

0	0.177	0.354	0.531	0.708	0.885
0.5	0.1957	0.3894	0.5841	0.7788	0.9735
1	0.2144	0.4248	0.6371	0.8496	1.062
1.5	0.2331	0.4602	0.6901	0.9204	1.1505
2	0.2518	0.4956	0.7431	0.9912	1.239
2.5	0.2705	0.531	0.796	1.062	1.3275
3	0.2892	0.5664	0.849	1.1328	1.416

مطالعات نشان داده است که کربن فعال، به ویژه هنگامی که با نانومواد کاتالیزوری مانند فنتون مانند MnO_2 آغشته یا دوخته شود، می تواند به طور موثر مقادیر بالایی از رادیکال های هیدروکسیل ایجاد کند که برای تجزیه آلاینده های پایدار در آب ضروری است (کمپتون، ۲۰۲۲). علاوه بر این، کربن فعال می تواند به عنوان کاتد برای تولید الکتریکی پراکسید هیدروژن (H_2O_2) برای واکنش فنتون استفاده شود، که منجر به تولید رادیکال های هیدروکسیل می شود که به طور موثر پاتوژن ها را در آب غیرفعال می کنند و پتانسیل آن را برای ضد عفونی آب در مقیاس بزرگ نشان می دهند (چن و همکاران، ۲۰۱۹). علاوه بر این، تولید کربن فعال از منابع زیست توده مانند پوسته هسته نخل (رازی و همکاران، ۲۰۱۸) و ساقه پنبه مورد مطالعه قرار گرفته است که نشان می دهد توانایی آن در بهبود پارامترهای کیفیت آب مانند pH، کدورت و نیاز شیمیایی اکسیژن در آب های سطحی و آب خاکستری (جاوادودین و همکاران، ۲۰۱۸).

۳-۳) تاثیر افزایش کربن فعال در حذف آلاینده ها هنگام اکسیداسیون با ازن

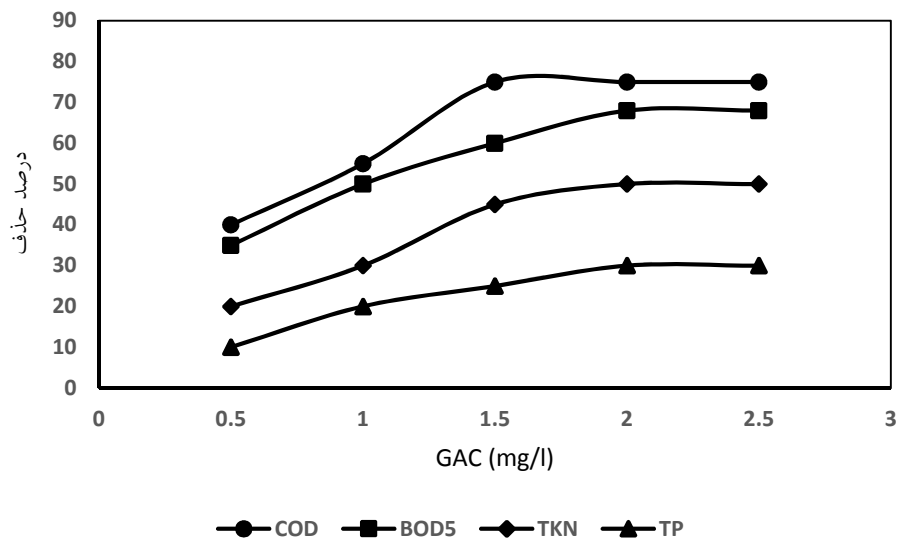
مقادیر حداکثر حذف COD به ۷۵ درصد، BOD5 به ۶۸ درصد، TKN به ۵۰ درصد، TP به ۳۰ درصد، و سورفکتانت به ۸۷ درصد محدود شده اند. با افزایش دوز کربن فعال تا ۱.۵ g/L، حذف پارامترها به حداکثر مقدار خود نزدیک می شود. پس از ۱.۵ g/L، راندمان حذف COD، BOD5، TKN و TP ثابت می ماند، اما حذف سورفکتانت تا ۲.۰ g/L افزایش می یابد. با توجه به جدول (۴) افزایش ده درصدی راندمان حذف COD در اثر استفاده همزمان از کربن فعال و اکسیداسیون شیمیایی با ازن قابل مشاهده است.

تحقیقات نشان داده است که ترکیب ازن سازی، کربن فعال بیولوژیکی و اولترافیلتراسیون ($O_3/BAC/UF$) به طور قابل توجهی کارایی حذف آلاینده هایی مانند تقاضای اکسیژن شیمیایی (COD)، کدورت، تقاضای

اکسیژن بیوشیمیایی پنج روزه (BOD5) و آلکیل بنزن سولفونات های خطی (LAS) از آب خاکستری مصنوعی را افزایش می دهد (شهسوانی و همکاران، ۲۰۲۲). کربنهای فعال، هنگامی که به مواد معدنی آلوده شوند، می توانند به عنوان کاتالیزور در فرآیند ازون سازی عمل کنند و بر تجزیه ازن به سمت رادیکال ها تأثیر بگذارند و توزیع محصولات واکنش تشکیل شده در حین اکسیداسیون را تغییر دهند (فیجوک و همکاران، ۲۰۲۱). علاوه بر این، استفاده از کربن فعال دانه ای تقویت شده زیستی در رآکتورهای بیوفیلم پویا نتایج امیدوار کننده ای را در دستیابی به نرخ حذف بالای آلاینده ها مانند COD و LAS نشان داده است و بر نقش مهم جذب و تجزیه زیستی در جذب و حذف آلاینده ها تأکید می کند (وانگ و همکاران، ۲۰۲۲). علاوه بر این، مطالعات در مورد مدل سازی و بهینه سازی حذف آلاینده های آلی تأثیر سطح خاص کربن فعال و دوز اکسیدکننده بر کارایی حذف آلاینده ها در طی فرآیندهای جذب و اکسیداسیون همزمان را برجسته کرده است (دابک و همکاران، ۲۰۲۰). این یافته ها به طور کلی تاثیر قابل توجه افزایش کربن فعال بر کارایی حذف آلاینده ها در طی اکسیداسیون با ازن در سیستم های تصفیه آب خاکستری را نشان می دهد.

جدول ۴) میزان حذف ترکیبات آلی فقط با کربن فعال

زمان (دقیقه)	راندمان حذف %	COD (mg/l)
۰	۰	۱۷۰
۳۰	۴۹	۸۵
۶۰	۶۵	۵۹,۵



شکل ۳) تاثیر هم افزایی کربن فعال در اکسیداسیون با ازن

۴) بحث

این یافته‌ها حاکی از آن است که افزایش بیشتر دوز ازن و زمان تماس از یک نقطه به بعد، منجر به اشباع شدن واکنش‌های اکسیداسیون شده و کارایی فرآیند را بهبود نمی‌بخشد. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که برای بهبود کارایی و کاهش هزینه‌های عملیاتی، مقدار ۲٫۵ میلی‌گرم بر لیتر ازن و زمان تماس ۶۰ دقیقه به عنوان شرایط بهینه انتخاب گردد.

افزایش غلظت GAC از ۰ به ۳ گرم در لیتر، منجر به افزایش ۷۸ درصدی تولید رادیکال‌های هیدروکسیل می‌شود. این افزایش تولید رادیکال‌های هیدروکسیل به دلیل افزایش سطح سطحی GAC برای جذب ازن و کاتالیز تجزیه آن به رادیکال‌های آزاد است. رادیکال‌های آزاد ازن با مولکول‌های آب واکنش داده و رادیکال‌های هیدروکسیل تولید می‌کنند، که نقش مهمی در اکسیداسیون و تجزیه آلاینده‌های آلی ایفا می‌کنند. این یافته‌ها نشان می‌دهد که استفاده از GAC در فرآیند اکسیداسیون با ازن می‌تواند به طور قابل توجهی تولید رادیکال‌های هیدروکسیل را افزایش داده و در نتیجه راندمان حذف آلاینده‌های آلی را بهبود بخشد. با این حال، باید به برخی محدودیت‌های این فرآیند نیز توجه داشت. هزینه بالای GAC می‌تواند منجر به افزایش هزینه‌های کلی تصفیه شود. علاوه بر این، GAC به مرور زمان اشباع می‌شود و نیاز به تعویض یا احیا دارد، که این موضوع می‌تواند

چالش‌هایی را در مدیریت و بهره‌برداری از سیستم‌های تصفیه به همراه داشته باشد. در مجموع، این مطالعه نشان می‌دهد که با وجود محدودیت‌های مذکور، افزایش غلظت GAC می‌تواند به عنوان یک استراتژی موثر برای بهبود راندمان فرآیند اکسیداسیون با ازن مورد استفاده قرار گیرد. نتایج نشان می‌دهد که کربن فعال نقش مهمی در بهبود راندمان حذف آلاینده‌ها دارد، اما این تأثیر در مقادیر بالاتر از ۱,۵ g/L برای اکثر پارامترها به اشباع می‌رسد و افزایش دوز کربن فعال پس از این نقطه به بهبود قابل توجهی منجر نمی‌شود. تنها استثنا در این مورد سورفکتانت‌ها هستند که حذف آن‌ها با افزایش دوز کربن فعال تا ۲,۰ g/L همچنان ادامه دارد.

منابع:

- Alekseev, S. E., & Pipko, D. A. (2018, October). Elaboration of an Efficiency Indicator of Treatment Industrial Waste Water by Ozone. In *Materials Science Forum* (Vol. 931, pp. 954-959). Trans Tech Publications Ltd.
- Chen, L., Pinto, A., & Alshawabkeh, A. N. (2019). Activated carbon as a cathode for water disinfection through the electro-fenton process. *Catalysts*, 9(7), 601.
- Compton, P., Dehkordi, N. R., Casanova, P. L., & Alshawabkeh, A. N. (2022). Activated carbon modifications for heterogeneous fenton-like catalysis. *Journal of chemical engineering and catalysis*, 1(2).
- Dąbek, L., Picheta-Oleś, A., Szeląg, B., Szulżyk-Cieplak, J., & Łagód, G. (2020). Modeling and optimization of pollutants removal during simultaneous adsorption onto activated carbon with advanced oxidation in aqueous environment. *Materials*, 13(19), 4220.
- Fijołek, L., Świetlik, J., & Frankowski, M. (2021). The influence of active carbon contaminants on the ozonation mechanism interpretation. *Scientific Reports*, 11(1), 9934.
- Jawaduddin, M., Memon, S., Nizamuddin, S., Mubarak, N. M., & Qureshi, S. (2018). Synthesis of activated carbon via sulphuric acid and iron chloride and its potential application synthetic grey water in combination with sand bed filter. *Eurasian Journal of Analytical Chemistry*, 13(6), 83-94.
- Joss, A., Siegrist, H., Ternes, T.A., 2008. Are we about to upgrade wastewater treatment for removing organic micropollutants. *Water Sci. Technol.* 57, 251e255.

Hernández-Leal, L., Temmink, H., Zeeman, G., & Buisman, C. J. N. (2011). Removal of micropollutants from aerobically treated grey water via ozone and activated carbon. *Water research*, 45(9), 2887-2896.

Mohammad Razi, M. A., Al-Gheethi, A., Al-Qaini, M., & Yousef, A. (2018). Efficiency of activated carbon from palm kernel shell for treatment of greywater. *Arab Journal of Basic and Applied Sciences*, 25(3), 103-110.

Shahsavani, E., Ehrampoush, M. H., Samaei, M. R., Mehrizi, E. A., Madadzadeh, F., Abbasi, A., ... & Ebrahimi, A. A. (2022). Real and synthetic greywater treatment by a combined process of ozonation, granular activated carbon, and ultrafiltration. *Health Scope*, 11(2).

Wang, Z., Yang, Y., Xiang, W., Wu, B., Cui, X., & Zhou, Y. (2022). Performance and mechanisms of greywater treatment in a bio-enhanced granular-activated carbon dynamic biofilm reactor. *npj Clean Water*, 5(1), 56.

Xiang, Y. H., Zhong, Y. Y., Li, X. D., & Song, J. K. (2013). Treatment of Organic Compounds in Radioactive Wastewater by Ozonation. *Advanced Materials Research*, 726, 2604-2608.