

۹۷۰۸۸



فناوری‌های نوین اکسایش

الکتروشیمیایی

(الکتروفتون)

مؤلفان:

دکتر عباس رضایی

مهندس مهشید لؤلؤیی

عضو هیئت علمی دانشگاه تربیت مدرس تهران

عضو هیئت علمی دانشگاه علوم پزشکی کرمان

ویراستار: سید رضا آقابور مقدم

سرشناسه	:	لولویی، مهشید، ۱۳۴۰ -
عنوان و نام پدیدآور	:	فناوری‌های نوین اکسایش الکتروشیمیایی (الکتروفتون)/ مولفان مهشید لولویی، عباس رضایی؛ ویراستار سیدرضا آقاپورمقدم.
مشخصات نشر	:	تهران: آوای دانش گستر، ۱۳۹۴.
مشخصات ظاهری	:	۲۰۰ ص.
شابک	:	۱۲۵۰۰۰ ریال : ۹-۵۴-۶۹۷۶-۶۰۰-۹۷۸
وضعیت فهرست نویسی	:	فیا
یادداشت	:	کتابنامه: ص. [۱۹۱] - ۱۹۹.
موضوع	:	اکسیداسیون و احیا
موضوع	:	الکتروشیمی
شناسه افزوده	:	رضایی، عباس، ۱۳۴۸ -
رده بندی کنگره	:	۱۳۹۴ الف ۶۳/۹ QD
رده بندی دیویی	:	۵۴۱/۳۹۳
شماره کتابشناسی ملی	:	۴۱۶۱۳۳۷

چاپ این کتاب در شورای تألیف و ترجمه دانشگاه علوم پزشکی کرمان مورخ ۱۳۹۴/۷/۱۲ به تصویب رسیده و به سفارش مؤلف و دانشگاه انجام شده است و ک حقوق مادی و معنوی آن به سرمایه‌گذاران تعلق دارد.

وبسایت و فروشگاه اینترنتی: www.avayee.ir

انتشارات آوای دانش گستر

نام کتاب:	فناوری‌های نوین اکسایش الکتروشیمیایی (الکتروفتون)
مؤلفان:	مهشید لولویی - دکتر عباس رضایی
ویراستار	سیدرضا آقاپور مقدم
نوبت و سال چاپ:	اول - ۱۳۹۵
ناشر:	آوای دانش گستر
حروفچینی و صفحه‌آرایی	زهره حسن‌پور
لیتوگرافی:	رایید گرافیک
چاپ و صحافی:	کهنمویی زاده
مدیر اجرایی و ناظر چاپ:	مجتبی سوری
شمارگان:	۵۰۰ نسخه
شابک:	۹-۵۴-۶۹۷۶-۶۰۰-۹۷۸
قیمت:	۱۲۵۰۰ تومان

انتشارات آوای دانش گستر

تهران، روبروی دانشگاه تهران، بین خ ۱۲ فروردین و فخر رازی، ساختمان ظروفچی، پلاک ۱۲۹۶، طبقه دوم واحد پنج.

تلفن: ۶۶۴۹۲۹۳۴ - ۶۶۴۸۳۰۳۰

کلیه حقوق برای مؤلف محفوظ است و هر گونه تکثیر به هر شکل بدون اجازه مؤلف و ناشر ممنوع می‌باشد و پیگیرد قانونی دارد.

فهرست مطالب

۱۱	پیشگفت. نویسندگان
۱۳	مقدمه
۱۹	فصل ۱: مقدمه‌ای بر الکتروشیمی و مروری بر اصل‌های آن
۱۹	الکتروشیمی
۱۹	فرایندهای اکسایش - کاهش
۱۹	عامل‌های اکسنده و کاهنده
۲۰	نیم واکنش‌ها
۲۱	واکنش‌های اکسایش - کاهش در سلول‌های الکتروشیمیایی
۲۲	سلول‌های الکتروشیمیایی
۲۳	رسانش در یک سلول الکتروشیمیایی
۲۴	اجزای سازنده سلول
۲۴	آند و کاتد
۲۴	واکنش‌ها در کاتد
۲۵	واکنش‌ها در آند
۲۶	اتصال مایع
۲۶	سلول‌های بدون اتصال مایع
۲۶	پل نمکی

۲۷	نمایش شمایی سلول‌ها
۲۸	سلول‌های برگشت‌پذیر و برگشت‌ناپذیر
۲۹	پتانسیل الکتروود
۲۹	ماهیت پتانسیل الکتروود
۳۰	الکتروودهای مرجع
۳۰	الکتروود گزینشی هیدروژن
۳۱	الکتروود هم‌وزن استاندارد
۳۱	سایر الکتروودهای مرجع
۳۲	تعریف پتانسیل الکتروود
۳۴	قرارداد برای پتانسیل الکتروود
۳۸	پتانسیل استاندارد الکتروود
۳۹	خواص پتانسیل استاندارد الکتروود
۴۰	محاسبه پتانسیل الکتروود از پتانسیل استاندارد
۴۳	پتانسیل استاندارد الکتروودها برای نیم واکنش‌های شامل تشکیل رسوب و کمپلکس
۴۵	جدول پتانسیل استاندارد الکتروودها
۴۶	برخی محدودیت‌ها در بهره‌گیری از پتانسیل استاندارد الکتروودها
۴۷	اثر تعادل‌های دیگر
۴۸	پتانسیل فرمال
۴۹	کاربرد داده‌های پتانسیل استاندارد
۴۹	محاسبه پتانسیل سلول‌های برگشت‌پذیر
۵۴	پتانسیل سلول‌های حقیقی
۵۴	پتانسیل اتصال مایع
۵۶	پتانسیل اهمی؛ افت IR
۵۷	اثرهای قطبش

۵۹	قطبش غلفتی
۵۹	قطبش سینتیکی
۶۰	الکترودهای مرجع
۶۱	الکترودهای کالومل
۶۳	الکترودهای نقره/نقره کلرید
۶۴	سلول‌های سوخت میکروبی MFC
۶۶	مبانی و کاربر سلول‌ها یا پیل‌های
۶۶	سلول سوخت میکروبی
۶۸	طبقه بندی سلول سوخت میکروبی
۶۸	سلول‌های سوخت میکروبی با محفظه تکی و دوتایی
۶۸	انواع سلول‌های سوخت میکروبی بر حسب واسطه انتقال دهنده الکترون
۶۹	اجزای سازنده سلول سوخت میکروبی
۶۹	محفظه آند و کاتد
۶۹	غشای تبادل پروتون
۷۰	مواد الکتروده و کاتالیزورها
۷۰	عوامل‌های عملیاتی سلول‌های سوخت میکروبی
۷۱	میکروارگانیزم‌های سلول سوخت میکروبی
۷۱	کاربرد سلول‌های سوخت میکروبی
۷۱	تصفیه فاضلاب
۷۲	دستگاه‌های پزشکی
۷۲	زیست حسگرها (بیوسنسورها)
۷۳	فصل ۲: فرایندهای اکسایش پیشرفته
۷۴	توان اکسیدکنندگی و واکنش پذیری رادیکال هیدروکسیل

۷۷	شیمی فنتون
۷۷	مبانی شیمی فنتون
۷۸	فرایند فنتون
۸۳	فرایند فوتوفنتون
۸۵	مبانی تولید الکتریکی هیدروژن پراکسید و کاربرد آن در پالایش آب
۸۵	مبانی و اصول پایه
۸۹	مواد کاتدی
۹۱	سلول‌های مجزا
۹۵	سلول‌های غیرمجزا
۹۹	فصل ۳: فرایند الکتروفنتون
۱۰۰	مبانی
۱۰۲	پیکربندی سلول
۱۰۲	کاهش کاتدی یون آهن (II)
۱۰۵	تولید آندی رادیکال هیدروکسیل
۱۰۸	ویژگی‌های آزمایشی
۱۰۸	محاسبه بازدهی جریان و عامل‌های انرژی
۱۰۹	تأثیر عامل‌های عملیاتی
۱۱۲	مدلسازی و روش شناسی طراحی آزمایشگاهی فرایند الکتروفنتون
۱۱۵	بهره‌گیری از دیگر کاتالیزگرهای فلزی
۱۱۶	سیستم‌های الکتروفنتون نو
۱۱۷	کاتالیزگرهای جامد ناهمگن
۱۱۷	رزین‌های دارای فلزهای واسطه
۱۱۹	کاتالیزگرهای سرامیکی (PILC)

۱۲۲.....	بهره‌گیری از نانو ذره‌های آهن
۱۲۲.....	واکنش‌های شبه فتون با بهره‌گیری از نانو ذره‌های آهن
۱۲۵.....	فصل ۴: فرایندهای ترکیبی الکتروفتون
۱۲۵.....	فرایند PC
۱۲۷.....	فرایندهای فوتوالکتروفتون (PEF) و الکتروفتون خورشیدی (SPEF)
۱۲۹.....	سایر فرایندهای نوری
۱۳۱.....	فرایند سول‌الکتروفتون (SEF)
۱۳۲.....	تولید کاتدی یون آهن (II)
۱۳۳.....	فصل ۵: الکتروفتون با تولید غیر مستقیم معرف
۱۳۳.....	فرایند فریدفتون
۱۳۵.....	فرایند پروکسیداسیون الکتروشیمیایی (ECP)
۱۳۶.....	پالایش آندی فتون (AFT)
۱۳۷.....	فرایندهای نوری ترکیبی
۱۳۷.....	روش یو الکتروکواگولاسیون
۱۴۰.....	روش‌های الکتروشیمیایی فتون با تولید غیرمستقیم معرف
۱۴۱.....	فصل ۶: کاربرد فرایندهای اکسایش پیشرفته
۱۴۱.....	کاربرد فرایندهای اکسایش پیشرفته (AOPs) در حذف آفت کش‌ها
۱۴۲.....	الکتروفتون با کاتد کربنی
۱۴۶.....	الکتروفتون با کاتد کربن شیشه‌ای مشبک
۱۴۶.....	فرایندهای ترکیبی
۱۴۶.....	سلول‌های پلاتین-اکسیژن مولکولی
۱۵۱.....	سلول BDD/O ₂

- سلول‌های آهن-اکسیژن مولکولی ۱۵۲
- پالایش با روش‌های AFT و ECP ۱۵۳
- کاربرد روش‌های اکسیداسیون پیشرفته در حذف رنگ‌ها ۱۵۵
- فرایند الکتروفتون ۱۵۵
- فرایند فوتوالکتروفتون ۱۵۹
- سایر روش‌های اکسایش پیشرفته بر مبنای شیمی فتون ۱۶۱
- کاربرد اکسایش پیشرفته در حذف مواد دارویی و فراورده‌های بهداشتی ۱۶۲
- کاربرد فرایند AOPs در حذف آلاینده‌های صنعتی ۱۶۷
- کاربرد فرایند اکسایش پیشرفته در حذف فنول و ترکیب‌های فنولی ۱۶۷
- کاربرد فرایند اکسایش پیشرفته در حذف ترکیب‌های آنیلین ۱۷۱
- کاربرد فرایند اکسایش پیشرفته در حذف مشتق‌های بنزویک و هتروآروماتیک ۱۷۲
- کاربرد فرایند اکسایش پیشرفته در حذف ترکیب‌های آلیفاتیک ۱۷۳
- کاربرد فرایند AOPs در حذف فاضلاب‌های واقعی ۱۷۵
- پیوست‌ها ۱۸۳
- پیوست ۱: واژه‌نامه ۱۸۳
- پیوست ۲: جداول پتانسیل‌های استاندارد الکترودی ۱۸۸
- کتابنامه ۱۹۴
- (۱) فارسی ۱۹۴
- (۲) لاتین ۱۹۴

به نام خدا

پیشگفتار نویسندگان

افزایش جمعیت و رشد اقتصادی، بهداشتی و اجتماعی جوامع انسانی از یک سو و روند رو به گسترش صنایع تولیدی از سوی دیگر، سبب افزایش ورود آلاینده‌های مضر و خطرناک به محیط زیست شده و جوامع انسانی را با دغدغه‌های پرشماری روبه‌رو ساخته است. گسترش بیماری‌ها، عارضه‌های زیست محیطی و بهداشتی، سمیت محیط آبریزان، کاهش اکسیژن محلول آبهای سطحی، دشواری‌هایی مانند اوتروفیکاسیون در منابع آبی به دلیل ورود آلاینده‌های گوناگون، بخشی از دشواری‌های بوجود آمده ناشی از عدم پالایش (تصفیه) درست فاضلاب است. هدف از پالایش فاضلاب، حذف آلاینده‌هایی است که در صورت تخلیه به منابع‌های پذیرنده برای محیط زیست مضر هستند. در این راستا، فاضلاب صنایع گوناگون به دلیل وارد کردن ترکیب‌های دیر تجزیه‌پذیر بیولوژیک و با قابلیت ته‌نشاندن، مانند سموم دفع آفت‌ها و فلزهای سنگین از اهمیت ویژه‌ای برخوردار هستند. روش‌های پیشنهادی که چندین دهه از آنها برای بی‌خطرسازی و پالایش فاضلاب‌های صنعتی بهره‌گیری می‌شده است در موردهایی، دیگر نمی‌توانند پاسخگوی نیازهای حال حاضر باشند. از این رو بهره‌گیری از فناوری‌های نوین با کارایی و هزینه مناسب مورد نیاز است. در سال‌های اخیر فناوری‌های پالایش فاضلاب با یک تحول ژرف به علت تغییرهای اساسی در مقررات حاکم بر دفع

آلاینده‌های خطرناک روبه‌رو شده‌اند. یکی از فناوری‌های نوین پیشنهادی، فرایند الکتروشیمیایی است. به‌گونه معمول فناوری‌های الکتروشیمیایی برای پالایش فاضلاب دارای فلزهای سنگین مورد بهره‌گیری قرار گرفته‌اند. با این وجود، اکسایش آلاینده‌های آلی مقاوم نیز از راهبردهای مطرح در این فرایند است. در حال حاضر روش‌های اکسایش الکتروشیمیایی به عنوان فرایندهای اکسایش پیشرفته شناخته شده‌اند. گسترش فرایندهای اکسایش آلاینده‌های آلی از راه سرعت دادن به تشکیل رادیکال‌های هیدروکسیل فعال، تحول اساسی در این زمینه ایجاد کرده است. فرایندهای الکتروفنتون از روش‌های مطرح و راهبردی در اکسایش الکتروشیمیایی هستند. برای پالایش فاضلاب کاربرد فراوانی پیدا کرده‌اند. در فرایندهای الکتروفنتون، مواد معدنی و کاتدی موجود در فاضلاب با بهره‌گیری از جریان‌های الکتریکی القایی، تثبیت و پالایش می‌شوند. شناخت اصل‌ها و کلیات فرایندهای الکتروفنتون و مسئله‌ها و دشواری‌های مرتبط با آن از جمله مباحثی است که لازم است کارشناسان گوناگون فعال در این زمینه، با آن آشنایی داشته باشند. در این کتاب سعی شده است که فرایندهای الکتروفنتون از دیدگاه‌های گوناگون علمی و اجرایی مورد بررسی قرار گیرند و مطالب به شیوه‌ای ارائه شوند که پژوهشگران و افراد دست‌اندر کار با فرایندهای پالایش فاضلاب، با بُعدهای گوناگون فرایند الکتروفنتون آشنا شوند. امید است این کتاب گامی مهم در بهینه‌سازی محیط زیست و گسترش پایدار باشد. همچنین این کتاب می‌تواند منبع مناسبی برای رشته‌های مهندسی بهداشت محیط، مهندسی محیط زیست، آب و فاضلاب، عمران، منابع طبیعی و دیگر رشته‌های مرتبط با این موضوع باشد.

با سپاس

مقدمه

آب برای ادامه زیست جانداران ضروری است. اگرچه بیشترین سطح کره زمین را آب تشکیل می‌دهد، یعنی حدود ۱۴۰۰ میلیون کیلومتر مربع، اما به‌تقریب ۹۷ درصد آن، آب‌های شور اقیانوس‌ها و دریاها است. کمتر از ۱ درصد آب شیرین برای مصارف انسانی قابل دسترس است. متأسفانه آلودگی آب تهدید جدی به شمار می‌رود. کیفیت آب مفهومی است که نوع و کمیت آلوده‌کننده‌های موجود آن را به عکس می‌سازد. به خوبی می‌دانیم که مقدارهای زیادی از انواع آلاینده‌های آلی مصنوعی، اعم از مواد شیمیایی صنعتی، آفت‌کش‌ها، رنگ‌ها و مواد دارویی و فرآورده‌های مراقبت شخصی (PPCPs) به‌گونه‌ای در انواع زیادی از فاضلاب‌ها رها و وارد کانال‌های آب طبیعی شده و در آنجا در محیط آبی انباشته می‌شوند. این آلودگی ناشی از فعالیت‌های شهری، صنعتی و کشاورزی انسان‌ها است و نمونه‌ای از آن را به‌گونه قابل توجهی در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب معمولی کاهش داد، زیرا بیشتر این ترکیب‌ها آلاینده‌های آلی پایداری (POPs)^۱ هستند که در برابر نور خورشید، دما و حمله میکروبی مقاوم هستند. در نتیجه، بیشتر این آلاینده‌ها در مقدارهای کم (میکروگرم در هر لیتر) در آب رودخانه‌ها، دریاچه‌ها، اقیانوس‌ها و حتی آب آشامیدنی در سراسر جهان وجود دارند. اگرچه خواص سرطان‌زایی، جهش‌زایی و باکتری‌کشی بیشتر آلاینده‌های آلی پایدار ناشناخته است، اما نگرانی زیادی برای

1. Pharmaceuticals and Personal Care Products/ PPCPs

2. Persistent organic pollutants/ POPs

حذف آنها از محیط آبی برای دوری از پیامدهای سمی و تأثیر خطرناک آنها بر سلامت جانداران از جمله انسان‌ها وجود دارد.

پژوهش‌های مربوط به پالایش فاضلاب، نوعی آگاهی‌های نو و دقیق را تجربه می‌کنند و بیشتر بر گسترش فناوری‌های ساده، ایمن، کارا و اقتصادی برای تخریب کامل آلاینده‌های مقاوم پیش از دفع پایانی متمرکز هستند. چندین بررسی جامع و گسترده، بازنگری مفصلی را دربارهٔ روش‌های دوستدار محیط زیست قابل دسترس برای بازیابی فاضلاب ارائه می‌دهند. ساده‌ترین و ارزاترین آنها، روش‌های بهسازی یا پالایش متداول هستند که می‌توان آنها را به دو گروه تقسیم بندی کرد.

(۱) فناوری‌های نسک/بازسازی بر پایهٔ روش‌های فیزیکی و شیمیایی

(۲) فناوری‌های تبدیل آلودگی تحت تأثیر روش‌های آنزیمی، میکروبیولوژیکی و شیمیایی هستند.

روش‌های پالایش فیزیکی- شیمیایی سنتی، ترکیب‌های مقاوم را از محیط آبی جدا می‌کنند بدون اینکه در ساختار شیمیایی آنها تغییری انجام گیرد. این روش‌های غیرتخریبی شامل جذب سطحی روی پایه‌های (نگاهدارنده) آلودگی را برآلی به گونهٔ معمول با کربن فعال شده، انعقاد و ته‌نشینی، شناورسازی، تقطیر، استخراج، فراییت، فرایندهای غشایی (میکرو- اولترا و نانوفیلتراسیون، اسمز معکوس و تبادل یونی) و انعقاد با آهک، آلومینیم یا نمک‌های آهن است در صورتی که روش‌های تبدیلی، سبب شکستن و در نهایت ساختاری و تبدیل آلاینده نخستین به چندین واسطه می‌شوند. از میان آنها، رایج‌ترین روش‌های شیمیایی، اوزون‌زنی و کلرزنی هستند. روش‌های اصلاح زیستی بیشتر مبتنی بر لجن فعال شده، صافی‌های چکنده، یا کشت‌های مختلط و خالص در شرایط هوازی یا بی‌هوازی هستند و به گونهٔ گسترده‌ای تنها به عنوان مرحله پایانی یا پالایش پایانی پیش از رهاسازی پساب به کار می‌روند. سوزاندن، فناوری پلاسما، فناوری الکترون حلال پوشیده^۱ و سدهای نفوذپذیر واکنشی^۲ نیز به

1. Solvated electron technology

2. permeable reactive barriers

عنوان فرایندهای جایگزین یا تبدیلی مکمل برای حجم‌های کمی از آلاینده‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند.

عدم کارایی روش‌های پالایش معمولی در حذف آلاینده‌های سمی و آلی سبب شده است تا دانشمندان در جست‌وجوی روش‌های بهتر و مناسب‌تری باشند. در این راستا، فناوری الکتروشیمیایی برای جلوگیری از دشواری‌ها و مسئله‌های مربوط به آلودگی، توجه زیادی را به خود جلب کرده است و در بازنگری و کتاب‌های مختلف به این نکته اشاره شده است. مزیت اصلی این فناوری، سازگاری آن با محیط است. زیرا الکترون، واکنشگر اصلی، نوعی واکنشگر تمیز ش.اخته می‌شود. الکتروشیمی همچنین از مزایای دیگری مانند بازدهی انرژی بالا، قابلیت خودکارسازی و ایمنی برخوردار است زیرا در شرایط ملایم کار می‌کند.

طی دهه گذشته، فرایندهای اکسایش پیشرفته (AOPs)^۱ به عنوان روش‌هایی توانمند و امیدبخش برای حذف آلاینده‌های غاوم آلی از آب توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند. فرایندهای اکسایش پیشرفته روش‌های شیمیایی، فوتوشیمیایی یا الکتروشیمیایی دوستدار محیط زیست بوده و دارای ویژگی مشترک تولید در محل رادیکال هیدروکسیل ($\text{OH}^\bullet$) به عنوان عامل اکسنده اصلی هستند. رایج‌ترین اکسایش شیمیایی، روش فنتون^۲ است که در آن مخلوطی از یون فرو و آب اکسیژنه (واکنشگر فنتون) برای شکستن آلاینده‌های مقاوم آلی بهره‌گیری می‌شود. توان اکسایش این روش را می‌توان با قراردادن پساب پالایش شده در معرض نور فرابنفش (روش فوتو-فنتون) یا نور خورشید (روش فوتو-فنتون خورشیدی) به گونه قابل توجهی بهبود بخشید. راه دیگر برای به دست آوردن بازدهی بیشتر، بهره‌گیری از روش فنتون همراه با الکتروشیمی است. اخیراً انواع فرایندهای پیشرفته اکسایش الکتروشیمیایی (EAOPs)^۳ نیز گسترش یافته‌اند. فرایندهای نوین اکسایش الکتروشیمیایی بر مبنای تخریب آلاینده‌های آلی مقاوم در آند یا با بهره‌گیری از واکنشگر فنتون هستند که از واکنش‌های

1. Advance oxidation processes

2. Fenton method

3. Electrochemical advanced oxidation processes

الکترودی تولید شده‌اند. از جمله این فرایندها، اکسایش آندی^۱ (AO) یا به اصطلاح تخریب الکتروشیمیایی است که می‌توان آن را با تولید آب اکسیژنه در کاتد $AO - H_2O_2$ نیز انجام داد. شکل ۱ فرایندهای نوین اکسایش الکتروشیمیایی و طبقه بندی آنها را نشان می‌دهد. رایج‌ترین فرایند، روش الکتروفتون (EF)^۲ است که در آن آب اکسیژنه در کاتد توسط اکسیژن خالص یا تغذیه با هوا در کاتد تولید می‌شود. ضمن اینکه کاتالیزگر آهن (یون Fe^{2+} یا Fe^{3+} یا اکسیدهای آهن) به پساب افزوده می‌شود. بهره‌گیری از روش‌های ترکیبی الکتروفتون نیز برای پالایش فاضلاب گزارش شده‌اند. این روش‌ها شامل روش‌های انعقاد پروکسی (PC)^۳، فوتوالکتروفتون (PEF)^۴، الکتروفتون با نور خورشید (SPEF)^۵، انعقاد فوتوپروکسی (PPC)^۶، الکتروفتون - فوتوالکتریک (PEC-EF)^۷، سونوالکتروفتون (SEF)^۸ و تولید کاتدی یون آهن (II) و همچنین فرایند ترکیبی فنتون با افزودن آب اکسیژنه به محلول یا تولید شده به صورت غیرمستقیم مانند فرایند فیرد-فنتون^۹، پروکسیداسیون الکتروشیمیایی (ECP)^{۱۰}، پالایش آندی فنتون (AFT)^{۱۱}، روش‌های ترکیبی، روش بیو پراکسایش الکتروشیمیایی و پالایش با کمک پلاسما هستند. در این روش‌ها توانایی تولید الکتریکی آب اکسیژنه در کاتد و تجمع آن در محلول از راه محاسبه بازدهی جریان (CE)^{۱۲} ارزیابی می‌شود.

1. Anodic oxidation
2. Electro-Fenton
3. Peroxi-Coagulation/PC
4. Photo electron-Fenton/PEF
5. Solar photo electro-Fenton/SPEF
6. Photo peroxi-Coagulation/PPC
7. Photo electro chemical electro-Fenton/PECEF
8. Sono electro-Fenton/SEF
9. Fered-Fenton
10. Electro chemical Peroxidation/ECP
11. Anodic Fenton treatment/AFT
12. Current efficiency/CE