

بہ نام خدا



# ازن زنی آب و فاضلاب

راهنمای کاربردی برای شناخت ازن و موارد استفاده آن

نوشته:

کریستین گاتچاک، جودی آن لیبرا، آدریان ساپ

مترجم:

سهیلا شکرالله زاده

عضو هیات علمی سازمان پژوهش های علمی و صنعتی ایران

سرشناسه	: گاتچاک، کریستین (Christiane) Gottschalk, C.
عنوان و نام پدیدآور	: ازن زنی آب و فاضلاب: راهنمای کاربردی برای شناخت ازن و موارد استفاده آن/ نویسندگان کریستین گاتچاک، جودی ا. لیبرا، آدریان ساپ؛ مترجم سهیلا شکرالله زاده.
مشخصات نشر	: تهران، سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران، ۱۳۹۷.
مشخصات ظاهری	: ۴۶۶ص. : مصور، جدول، نمودار.
شابک	: ۹۷۸-۶۰۰-۹۷۲۳۱-۹-۵ ریال ۳۸۰۰۰۰
وضعیت فهرست نویسی	: فیپا
عنوان اصلی	: Ozonation of Water and Waste Water: A Practical Guide to Understanding Ozone and its Applications, 2010.
عنوان دیگر	: راهنمای کاربردی برای شناخت ازن و موارد استفاده آن.
موضوع	: آب -- تصفیه -- ازن زنی
موضوع	: Water -- Purification -- Ozonation
موضوع	: فاضلاب -- تصفیه -- ازن زنی
موضوع	: Waste Water -- Purification -- Ozonation
یادداشت	: واژه‌نامه.
شناسه افزوده	: لیبرا، جودی ا. J. A. (Judy A) Libra
شناسه افزوده	: ساپ، آدریان (Adrian) Saupe, A.
شناسه افزوده	: شکرالله زاده، سهیلا، ۱۳۴۲، مترجم
شناسه افزوده	: سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران
رده بندی کنگره	: الف ۴۲/گ۴۱/۴TD ۱۳۹۷
رده بندی دیویی	: ۶۲۸/۱۶۶۲
شماره کتاب‌شناسی ملی	: ۵۲۵۹۲۶۸

## سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران



### ازن زنی آب و فاضلاب: راهنمای کاربردی برای شناخت ازن و موارد استفاده آن

مترجم: سهیلا شکرالله زاده

ناشر: سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران

نوبت چاپ: اول

تاریخ چاپ: ۱۳۹۷

شمارگان: ۱۰۰۰ جلد

چاپ و صحافی: افست گرافیک

ناظر چاپ و مجری: نشر پرچین

ویراستار: لیلا اجاقلو، زینب اصغری بیرام، حمیرا شکوهی

طراح روی جلد: سمیه عرب‌لو

قیمت: ۳۸۰۰۰۰ ریال

نشانی: تهران، احمدآباد مستوفی، بعد از میدان پارسا، خیابان انقلاب، خیابان شهید احسانی راد، صندوق پستی: ۱۱۵-۳۷۵۷۵

## پیش‌گفتار مترجم

چندین سال است که ازن به‌عنوان یک اکسنده مؤثر در تصفیه آب و فاضلاب شناخته می‌شود. به‌دلیل خواص منحصر به فرد ازن و وضع قوانین سختگیرانه‌تر جهانی در مورد باقی ماندن محصولات جانبی گندزداها، کاربردهای آن طی سال‌های اخیر گسترش یافته است. اگرچه ازن‌زنی در دسته روش‌های متداول تصفیه شیمیایی آب و فاضلاب قرار می‌گیرد، ولی به‌دلیل تولید رادیکال‌های بسیار فعال هیدوکسیل از تجزیه ازن، در فرایندهای اکسایش پیشرفته نیز بسیار مورد استفاده قرار گرفته است. با وجود اطلاعات گسترده‌ای که در زمینه ازن و کاربرد آن در تصفیه آب و فاضلاب وجود دارد، منابع اندکی به زبان فارسی انتشار یافته است. هدف از ترجمه این کتاب، ارائه اطلاعات کاربردی برای طراحی، انجام آزمایش‌های تجربی، مدل‌سازی و کاربرد ازن‌زنی در صنعت می‌باشد. آنچه این کتاب را ارزشمند می‌سازد، دانش وسیعی از اصول پایه ازن‌زنی تا مباحث طراحی فرایند و راکتورها و سینتیک و انتقال جرم است که در آن به‌صورت یک‌جا ارائه شده است. بدین ترتیب، می‌توان تمامی موارد مربوط به طراحی تا انجام آزمون و افزایش مقیاس واحدهای تصفیه آب و فاضلاب با ازن‌زنی را در کنار هم مشاهده نمود. این کتاب می‌تواند به دانشجویان، پژوهشگران و متخصصین صنایع کمک نماید تا در زمینه کاربرد ازن در موارد مورد نظر خود، داده‌های مناسب را به‌دست آورده و یا سامانه‌های موجود را بهینه‌سازی نمایند. ساختار کلی کتاب، در پیش‌گفتار نویسنده مورد اشاره قرار گرفته است.



## پیش‌گفتار نویسنده

از زنی ترکیبات در آب یک فرایند پیچیده با مکانیسم‌های مشکل بوده و پارامترهای درگیر در آن بسیارند، ولی توانایی زیادی در توسعه روش‌های تصفیه اقتصادی برای آب و فاضلاب دارد. برای بهره بردن از این توانایی، دانستن این‌که چه پارامترهایی در فرایند مشارکت می‌کنند، کدام یک مهم هستند و چگونه فرایند را تحت‌تأثیر قرار می‌دهند، دارای اهمیت است.

به دلیل این‌که فرایند از زنی بسیار به سامانه مورد استفاده وابسته است، اغلب کاربردهای صنعتی ابتدا به صورت آزمایشگاهی مورد آزمون قرار می‌گیرند؛ بدین مفهوم که طراحان و سازندگان سامانه‌های تصفیه، محققین و کاربران صنعتی از زنی، نه تنها اصول پایه مکانیسم‌های از زنی، بلکه چگونگی طراحی و راه‌اندازی آزمون‌هایی را باید بدانند تا نتایجی را به دست آورند که قابل تفسیر، برون‌یابی و کاربردی باشد.

اغلب کتاب‌های موجود بر تصفیه آب و فاضلاب تمرکز داشته و کم‌تر به توضیح تفاوت‌های اساسی در فرایندهای تصفیه و یا به هر دوی آن‌ها پرداخته‌اند. تنها در تعداد اندکی از منابع، چگونگی انجام آزمون‌ها مورد اشاره قرار گرفته است.

این کتاب، سعی در پر کردن این فاصله داشته و حاوی دانش گسترده‌ای است که به وسیله نویسندگان و محققین، آموزگاران و توسعه‌دهندگان سامانه‌های از زنی در زمینه طراحی، اجرا، تفسیر و کاربرد تجربی جمع‌آوری شده است. این نوشتار، با بهره‌گیری از نتایج تجربی به دست آمده از ساعت‌ها تحقیقات آزمایشگاهی آب و فاضلاب، مطالعه منابع و بحث گسترده با متخصصین پیشرو و تفکر عمیق، کمک می‌کند که در عمل از اشتباهات معمولی و کارهای غیرضروری پیشگیری شود.

افراد مورد هدف این کتاب، عبارتند از متخصصین صنایع و تحقیقات که در حال حاضر از زنی استفاده نموده و می‌خواهند سامانه خود را بهینه نمایند و دانشجویانی که در ابتدای کار با از زنی هستند. منابع بسیار زیادی امروزه در مورد از زنی وجود دارد، ولی اطلاعات در مورد استفاده کاربردی از آن برای مبتدیان محدود است.

این راهنمای عملی، با مرور تئوری‌های موجود، نتایج تخصصی را در یک متن جامع کوتاه، جداول و اشکال به همراه مراجع مهم ارائه می‌کند. هم‌چنین، اطلاعاتی کافی به مبتدیان برای شروع به کار با از زنی ارائه نموده، ولی به اطلاعات جزئی‌تری که خوانندگان پیشرفته‌تر نیاز دارند نیز می‌پردازد.

با توجه به کارهای بسیاری که در زمینه از زنی از زمان انتشار نسخه اول این کتاب تاکنون انجام شده، نیاز به نسخه جدید احساس شد. تغییراتی که در مقررات مربوط به محصولات جانبی گندزدایی در قسمت‌های مختلف جهان داده شده، باعث تحرک استفاده از از زنی در کاربردهای

مختلف آب شده است. همچنین، توجه به ریزآلاینده‌ها در جریان خروجی فاضلاب موجب استفاده از ازن در تصفیه فاضلاب‌های شهری به‌عنوان فرایند نهایی پیش از تخلیه به محیط شده است. یک هدف مهم در به‌روزرسانی کتاب، خلاصه‌سازی این پیشرفت‌ها بوده است. اگرچه، همچنان دانستن اصول اولیه برای هر شخصی که می‌خواهد کار با ازن را آغاز نماید به‌ویژه دانشجویان، محققین و اشخاصی که در بخش طراحی و توسعه فناوری می‌باشند، ضروری است.

ساختار کتاب به دو بخش مروری بر ازن (بخش اول) و استفاده از ازن (بخش دوم) تقسیم شده است. در بخش اول، مروری بر محصولات جانبی گندزدایی شده تا کاربردهای وسیع‌تر ازن و تاریخچه کوتاهی از استفاده از آن و مروری بر کاربردهای خاص ازن را ارائه نماید. بخش اول پیش‌نیازهای کلی را در ازن‌زنی فراهم می‌کند و به‌طور خلاصه سمیت ازن، مکانیسم‌های واکنش آن، و کاربردهای صنعتی ازن‌زنی را مطرح می‌کند. این مطالب، انگیزه فعالیت‌های تجربی کاربرد ازن در آزمایشگاه را فراهم می‌نماید. در بخش دوم، جنبه‌های کاربردی توسعه داده شده و تفاوت‌های آن در کاربردهای فاضلاب و آب آشامیدنی مورد بررسی قرار گرفته و در آن تلاش شده که اطلاعاتی در زمینه چگونگی استفاده از ازن گفته شود. فصل ۴ مروری بر موارد طراحی تجربی و راکتور را ارائه کرده که مورد نیاز افرادی است که نیاز به یادآوری سریع مطالبی دارند که در کلاس‌های خود آموخته‌اند، در حالی که فصل‌های ۶ و ۸ پایه‌های مدل‌سازی کل فرایند را مرور کرده است. در فصل ۶ تئوری‌های جدید انتقال جرم مطرح شده و فصل ۸ بر مدل‌سازی فرایند با ارائه تفاوت‌های بین آب آشامیدنی و فاضلاب تمرکز دارد. در این بخش، ابتدا طراحی آزمون‌ها و تجهیزات مورد نیاز به همراه روش‌های آنالیز و ارزیابی داده‌ها مورد بحث قرار گرفته و سپس، پیش‌زمینه تئوری مورد نیاز برای انجام این فعالیت‌ها گفته شده است. در این‌جا، هدف آن است که اصول مورد نیاز برای ایجاد پایه‌ای محکم ارائه شود تا با آن خواننده بتواند درک عمیق‌تری در خواص ازن‌زنی پیدا نماید. بخش دوم با بحث در مورد کاربردهای ازن در ترکیب با سایر فرایندهای تصفیه به اتمام می‌رسد.

## مقدمه نویسنده

قرار گرفتن در هزاره سوم در برلین، شهری که حدود ۱۵۰ سال پیش شرکت زیمنس اولین ژنراتور ازن را آنجا ساخت، و نوشتن کتابی در مورد کاربردهای ازن در آب، کمی فیلسوفانه به نظر می‌رسد. به‌ویژه، هنگامی که شخص با آشفتگی فکری افراد مواجه است که می‌پرسند چرا انسان ازن را تولید کرد و چگونه باید از آن در آب استفاده کرد.

ازن می‌تواند به‌صورت گاز یا محلول در مایع حضور داشته باشد. اغلب نوشته‌ها در مورد ازن گازی تدوین شده، به‌عنوان مثال، این که لایه ازن مفید جو زمین در حال تخریب است و به‌همین دلیل امواج فرابنفش خورشید به سطح زمین می‌رسد. از طرف دیگر، گزارش‌ها و رسانه‌ها ما را از وجود غلظت‌های بسیار بالای ازن در هوا در روزهای آفتابی برحذر می‌دارند که ممکن است باعث زیان رساندن به سلامتی انسان و محیط زیست شود. اگر مشخص نشده باشد که تأثیر ازن بستگی به محل به‌کارگیری آن دارد، اثرات سودمند و زیان‌بار ازن می‌تواند گیج‌کننده باشد.

مطالعه مروری نشان داده که آب خالص حاوی تنها ۱/۹٪ از مولکول  $H_2O$  است. اگرچه، آلودگی آب باعث چنین تغییرات بزرگی در ترکیب منابع آبی ما نمی‌شود، اما ما اجازه داده‌ایم که موادی وارد چرخه آب طبیعی شوند که آثار زیانبار بر سلامتی بشر و محیط‌زیست طبیعی دارند؛ در نتیجه، اغلب نیازمند فرایندهای تصفیه بیش‌تری هستیم تا آب آشامیدنی را برای مصرف روزانه مهیا کنیم. فرایندهای تصفیه فاضلاب و آب‌های زیرزمینی نیز مورد نیاز است تا بتوان از آلودگی‌های بیش‌تر آن‌ها ممانعت نمود. در این‌جا، ازن می‌تواند کمک کند. ازن قابلیت اکسید کردن تعداد زیادی از آلاینده‌ها به روشی دوست‌دار محیط زیست را دارد، زیرا هیچ محصول نهایی و میانی زیانباری را تشکیل نداده و هم‌چنین پسماند ثانویه‌ای تولید نمی‌کند. متأسفانه، گاهی نمی‌توان از گاز ازن در غلظت‌های بالا موجود در هوای تنفسی استفاده نمود (بیش از  $240 \mu\text{g m}^{-3}$ ) ولی باید برای تولید آن از هوا یا اکسیژن خالص از ژنراتورهای گاز ازن با مصرف انرژی بالا استفاده نمود تا به غلظت‌هایی با ضریب یک میلیون بالاتر رسید ( $240 \text{ g m}^{-3}$ ).

با گذشت تقریباً ۱۵۰ سال پس از تولید اولین ژنراتور ازن، این کتاب با طرح این موضوع که چگونه باید با ازن آزمایش انجام داد، نشان می‌دهد که ازن‌زنی مطلبی پیچیده می‌باشد. کتاب‌ها و مقالات مرجع فراوانی در زمینه اصول ازن‌زنی، واکنش‌های شیمیایی و اثر برخی پارامترها بر آن وجود دارد. البته، اغلب آن‌ها بر تصفیه آب آشامیدنی یا فاضلاب اشاره می‌کنند و به ندرت بر هر دوی آن‌ها تمرکز دارند. این مطلب نشان‌دهنده تجربه شخصی ماست که این‌ها دو “جهان” مجزا هستند. از

آنجا که کاربردهای ازن در فرایندهای صنعتی در حال رشد است، حتی بیش تر مردم با نگرش‌های مختلف نیازمند دسترسی به اطلاعاتی در مورد ازن و استفاده از نتایج آن برای کاربردهای مختلف می‌باشند. در این کتاب، بر اساس سابقه در تصفیه آب آشامیدنی و فاضلاب صنعتی، سعی کرده‌ایم بین این دو فاصله پل بزنیم.

زمینه دیگری که در منابع گذشته کم‌تر وجود دارد، چگونگی انجام آزمایش با ازن است. این اطلاعات، به‌طور معمول کم‌تر توسط دانشجویان دکتری و پرسنل آزمایشگاهی به‌دست می‌آید. این فقدان اطلاعات باعث شد تا کتابی نوشته شود که حاوی نه تنها اطلاعات پایه‌ای در رابطه با سم‌شناسی ازن، مکانیسم‌های واکنش، و کاربردهای مقیاس صنعتی ازن‌زنی باشد (بخش اول: مروری بر ازن)، بلکه در زمینه این که چگونه آزمایش‌ها را باید راه‌اندازی کرد تا نتایج قابل تفسیر و برون‌یابی به دست دهند، اطلاعات ارائه دهد (بخش دوم: استفاده از ازن). آزمایشگر با ابزاری آشنا خواهد شد که نتایج او را اصلاح کرده و قادر به تفسیر نتایج ارائه شده در مقالات می‌باشد. مراجع مهم ارائه شده‌اند تا خواننده‌ای را که تمایل به داشتن اطلاعات عمیق‌تری دارد به‌طور مستقیم یاری دهد. بحث در مورد کاربردهای ترکیب ازن با سایر فرایندها نشان می‌دهد که چگونه خاصیت اکسایشی ازن می‌تواند مورد بهره‌برداری قرار گیرد.

## فهرست مطالب

۱	بخش اول: مروری بر ازن
۳	فصل اول: سم‌شناسی
۳	۱.۱. پیشینه
۶	۲.۱. ازن در حالت گازی
۶	۱.۲.۱. تنفس
۶	۲.۲.۱. تماس با پوست
۷	۳.۲.۱. تماس با چشم
۸	۳.۱. ازن در حالت مایع
۸	۴.۱. محصولات جانبی
۱۲	منابع
۱۵	فصل دوم: مکانیسم واکنش
۱۵	۱.۲. ازن‌زنی
۱۵	۱.۱.۲. واکنش غیرمستقیم
۱۶	۱.۱.۱.۲. مرحله آغاز
۱۶	۲.۱.۱.۲. واکنش زنجیره‌ای رادیکال
۱۸	۳.۱.۱.۲. مرحله پایان
۱۸	۴.۱.۱.۲. واکنش کلی
۲۰	۲.۱.۲. واکنش مستقیم
۲۴	۲.۲. فرایندهای اکسایش پیشرفته
۲۴	۱.۲.۲. ازن / هیدروژن پراکسید ( $O_3/H_2O_2$ )
۲۵	۲.۲.۲. ازن / تابش UV ( $O_3/UV$ )
۲۶	۳.۲.۲. هیدروژن پراکسید / تابش UV ( $H_2O_2/UV$ )
۲۹	منابع
۳۳	فصل سوم: کاربردهای ازن
۳۳	۱.۳. روند توسعه
۳۹	۲.۳. مروری بر کاربردهای ازن
۴۱	۱.۲.۳. ازن در فاز گازی
۴۳	۲.۲.۳. ازن در فاز مایع

۴۶	..... ۳.۳.۳. ازن در تصفیه آب آشامیدنی
۴۸	..... ۱.۳.۳. گندزدایی
۵۱	..... ۲.۳.۳. اکسایش ترکیبات معدنی
۵۲	..... ۳.۳.۳. اکسایش ترکیبات آلی
۵۲	..... ۱.۳.۳.۳. ماده آلی طبیعی (NOM)
۵۵	..... ۲.۳.۳.۳. ریزآلاینده‌های آلی
۵۸	..... ۴.۳.۳. فرایندهای حذف ذرات جامد
۵۹	..... ۴.۳.۳. ازن‌زنی در تصفیه فاضلاب
۶۰	..... ۱.۴.۳. گندزدایی
۶۲	..... ۲.۴.۳. اکسایش ترکیبات معدنی
۶۳	..... ۳.۴.۳. اکسایش ترکیبات آلی
۶۷	..... ۱.۳.۴.۳. شیرابه زباله‌های دفن‌شده - معدنی‌سازی جزئی
۶۹	..... ۲.۳.۴.۳. فاضلاب‌های نساجی - حذف رنگ و معدنی‌سازی جزئی
۷۰	..... ۳.۳.۴.۳. سایر کاربردها
۷۱	..... ۴.۴.۳. فرایندهای حذف ذرات
۷۲	..... ۵.۳. جنبه‌های اقتصادی ازن‌زنی
۷۶	..... منابع
۸۵	..... <b>بخش دوم: استفاده از ازن</b>
۸۷	..... فصل چهارم: طراحی آزمایش
۸۸	..... ۱.۴. فرایند طراحی آزمایش
۹۲	..... ۲.۴. گام‌های طراحی آزمایش
۹۲	..... ۱.۲.۴. تعریف اهداف
۹۴	..... ۲.۲.۴. تعریف سامانه
۱۰۱	..... ۳.۲.۴. انتخاب روش‌های آزمون و ارزیابی داده‌ها
۱۰۵	..... ۱.۳.۲.۴. ازن
۱۰۶	..... ۲.۳.۲.۴. ترکیب هدف (M)
۱۰۷	..... ۴.۲.۴. تعیین روش آزمایش
۱۰۸	..... ۵.۲.۴. ارزیابی داده‌ها
۱۱۵	..... ۶.۲.۴. تعیین نتایج

۱۲۲	۳.۴ طراحی راکتور
۱۲۲	۱.۳.۴ انواع راکتورها
۱۲۳	۱.۱.۳.۴ شرایط عملیاتی
۱۲۴	۲.۱.۳.۴ همزدگی
۱۲۵	۲.۳.۴ مقایسه انواع راکتور
۱۳۰	۳.۳.۴ طراحی راکتورهای اکسایش شیمیایی
۱۳۱	۱.۳.۳.۴ سامانه واکنش
۱۳۴	۲.۳.۳.۴ سامانه‌های جانبی
۱۳۵	۳.۳.۳.۴ یکپارچگی فرایند
۱۳۵	۴.۳.۳.۴ قابلیت کنترل
۱۳۶	۵.۳.۳.۴ یکپارچگی محل اجرا
۱۳۶	۴.۴ فهرست‌های طراحی آزمایش
۱۳۶	۱.۴.۴ فهرست هر گام از طراحی آزمایش
۱۴۰	۵.۴ برگ‌داده‌های ازن
۱۴۵	منابع
۱۴۷	فصل پنجم: تجهیزات تجربی و شیوه‌های تحلیلی
۱۴۷	۱.۵ جنس مواد در تماس با ازن
۱۵۱	۱.۱.۵ مواد ساخت در واحدهای مقیاس بزرگ یا پیش‌تاز
۱۵۱	۱.۱.۱.۵ راکتورها
۱۵۲	۲.۱.۱.۵ لوله‌کشی
۱۵۲	۲.۱.۵ مواد ساخت در واحدهای مقیاس آزمایشگاهی
۱۵۳	۱.۲.۱.۵ راکتورها
۱۵۴	۲.۲.۱.۵ لوله‌کشی
۱۵۴	۲.۵ تولید ازن
۱۵۶	۱.۲.۵ ژنراتورهای ازن تخلیه الکتریکی
۱۵۹	۱.۱.۲.۵ شیمی
۱۶۱	۲.۱.۲.۵ مهندسی و بهره‌برداری
۱۶۳	۳.۱.۲.۵ نوع گاز خوراک و تهیه آن
۱۶۴	۴.۱.۲.۵ غلظت ازن، ظرفیت تولید و مصرف ویژه انرژی

- ۱۶۵.....۵.۱.۲.۵ کاربرد ژنراتورهای ازن تخلیه الکتریکی در آزمون‌های آزمایشگاهی.....
- ۱۶۷.....۲.۲.۵ ژنراتورهای ازن الکترولیزی (ELOG).....
- ۱۶۹.....۱.۲.۲.۵ استفاده از ژنراتورهای ازن الکترولیزی در آزمون‌های تجربی.....
- ۱۷۰.....۳.۵ راکتورهای استفاده شده برای ازن‌زنی.....
- ۱۷۱.....۱.۳.۵ مروری بر رفتار هیدرودینامیکی و انتقال جرم.....
- ۱۷۶.....۲.۳.۵ راکتورهای گازدهی شده مستقیم.....
- ۱۷۷.....۱.۲.۳.۵ ستون‌های حبابی و راکتورهای مشابه.....
- ۱۷۸.....۲.۲.۳.۵ راکتورهای همزده.....
- ۱۷۹.....۳.۳.۵ راکتورهای بدون گازدهی و غیرمستقیم.....
- ۱۸۰.....۱.۳.۳.۵ راکتورهای لوله‌ای.....
- ۱۸۳.....۲.۳.۳.۵ راکتورهای غشایی.....
- ۱۸۶.....۴.۳.۵ انواع تماس‌دهنده‌های گاز.....
- ۱۹۰.....۵.۳.۵ حالت عملیات.....
- ۱۹۱.....۶.۳.۵ آزمون تجربی.....
- ۱۹۱.....۱.۶.۳.۵ آزمون‌های تجربی جریان ناپیوسته.....
- ۱۹۳.....۲.۶.۳.۵ آزمون‌های تجربی جریان پیوسته.....
- ۱۹۳.....۳.۶.۳.۵ ترکیب فرایندها.....
- ۱۹۴.....۴.۵ اندازه‌گیری ازن.....
- ۱۹۴.....۱.۴.۵ شیوه‌ها.....
- ۱۹۴.....۱.۱.۴.۵ یدومتری (گاز و مایع).....
- ۱۹۵.....۲.۱.۴.۵ جذب UV (گاز و مایع).....
- ۱۹۶.....۳.۱.۴.۵ جذب نور مرئی (گاز و مایع).....
- ۱۹۷.....۴.۱.۴.۵ ایندیگو (مایع).....
- ۱۹۷.....۵.۱.۴.۵ N,N - دی اتیل - ۴و۱ فنیلن دی آمونیوم - DPD (مایع).....
- ۱۹۸.....۶.۱.۴.۵ نورتابی شیمیایی (CL) (مایع).....
- ۱۹۹.....۷.۱.۴.۵ الکتروود غشایی ازن (مایع).....
- ۲۰۰.....۲.۴.۵ موارد کاربردی اندازه‌گیری ازن.....
- ۲۰۱.....۵.۵ موارد ایمنی.....
- ۲۰۱.....۱.۵.۵ تخریب گاز ازن خروجی.....

۲۰۴	..... ۲.۵.۵. ردیابی ازن هوای محیط
۲۰۵	..... ۶.۵. پرسش‌ها، مشکلات و اشکالات معمول
۲۱۱	..... منابع
۲۱۷	..... فصل ششم: انتقال جرم
۲۱۷	..... ۱.۶. تئوری انتقال جرم
۲۱۹	..... ۱.۱.۶. انتقال جرم در یک فاز
۲۲۰	..... ۲.۱.۶. انتقال جرم بین دو فاز
۲۲۲	..... ۳.۱.۶. غلظت تعادلی برای ازن
۲۲۷	..... ۴.۱.۶. تئوری دو فیلمی
۲۲۸	..... ۲.۶. پارامترهای مؤثر بر انتقال جرم
۲۳۰	..... ۱.۲.۶. انتقال جرم با واکنش‌های شیمیایی هم‌زمان
۲۳۲	..... ۱.۱.۲.۶. همبستگی انتقال جرم و واکنش شیمیایی
۲۳۷	..... ۲.۱.۲.۶. تأثیر رژیم سینتیکی بر تعیین ضرایب انتقال جرم
۲۳۹	..... ۲.۲.۶. پیش‌بینی ضریب انتقال جرم
۲۴۰	..... ۱.۲.۲.۶. ضریب تنا- ضریب تصحیح برای دما
۲۴۱	..... ۲.۲.۲.۶. ضریب آلفا- ضریب تصحیح برای ترکیب آب
۲۴۲	..... ۳.۲.۶. اثر ترکیبات آب در انتقال جرم
۲۴۲	..... ۱.۳.۲.۶. تغییر در ائتلاف حباب
۲۴۳	..... ۲.۳.۲.۶. تغییر در کشش سطحی
۲۴۵	..... ۳.۶. تعیین ضرایب انتقال جرم
۲۴۶	..... ۱.۳.۶. انتخاب بین تعیین مستقیم یا غیرمستقیم $k_{La}(O_3)$
۲۴۷	..... ۲.۳.۶. شرایط کلی آزمایش و روش‌های ارزیابی
۲۴۹	..... ۱.۲.۳.۶. غلظت تعادلی $c_L^*$
۲۵۰	..... ۳.۳.۶. روش‌های حالت ناپایا بدون افزایش انتقال جرم
۲۵۱	..... ۱.۳.۳.۶. مدل جریان ناپیوسته
۲۵۱	..... ۲.۳.۳.۶. روش تجربی
۲۵۲	..... ۳.۳.۳.۶. مدل جریان پیوسته
۲۵۳	..... ۴.۳.۳.۶. روش تجربی
۲۵۳	..... ۴.۳.۶. روش‌های حالت پایا بدون افزایش انتقال جرم

۲۵۴	۱.۴.۳.۶. مدل‌های جریان پیوسته و نیمه‌پیوسته.....
۲۵۵	۲.۴.۳.۶. روش تجربی.....
۲۵۶	۳.۴.۳.۶. تعیین هم‌زمان $k_{La}$ و $n_L$ .....
۲۵۶	۵.۳.۶. روش‌های با افزایش انتقال جرم.....
۲۵۸	۱.۵.۳.۶. روش تجربی.....
۲۵۸	۶.۳.۶. مشکلات تعیین ضرایب انتقال جرم.....
۲۵۹	۱.۶.۳.۶. روش حالت ناپایا.....
۲۶۰	۲.۶.۳.۶. روش حالت پایا.....
۲۶۲	منابع.....
۲۶۷	فصل هفتم: سینتیک واکنش.....
۲۶۷	۱.۱.۷. درجه واکنش.....
۲۷۱	۱.۱.۷. روش تجربی برای تعیین درجه واکنش $n$ .....
۲۷۲	۱.۱.۱.۷. روش نیمه عمر.....
۲۷۳	۲.۱.۱.۷. روش سرعت اولیه واکنش.....
۲۷۳	۳.۱.۱.۷. سعی و خطا.....
۲۷۵	۲.۲.۷. ثابت‌های سرعت واکنش.....
۲۷۶	۱.۲.۷. تعیین ثابت‌های سرعت.....
۲۸۰	۳.۷. عوامل مؤثر بر سرعت واکنش.....
۲۸۰	۱.۳.۷. غلظت اکسندها.....
۲۸۰	۱.۱.۳.۷. واکنش‌های مستقیم.....
۲۸۱	۲.۱.۳.۷. واکنش‌های غیرمستقیم یا رادیکالی هیدروکسیل.....
۲۸۲	۲.۳.۷. وابستگی به دما.....
۲۸۲	۳.۳.۷. اثر pH.....
۲۸۳	۴.۳.۷. اثر کربن معدنی.....
۲۸۴	۵.۳.۷. اثر نمک‌های معدنی.....
۲۸۵	۶.۳.۷. اثر کربن آلی بر مکانیسم واکنش زنجیره‌ای رادیکالی.....
۲۸۸	منابع.....
۲۹۳	فصل هشتم: مدل‌سازی فرایندهای ازن‌زنی.....
۲۹۶	۱.۱.۸. مدل‌سازی ازن.....

۲۹۷	۱.۱.۸. مشکلات مدل سازی ازن
۳۰۰	۲.۱.۸. مدل شیمیایی ازن زنی
۳۰۱	۳.۱.۸. مدل ریاضی ازن زنی
۳۰۲	۱.۳.۱.۸. موازنه های جرم
۳۰۳	۲.۳.۱.۸. معادلات سرعت
۳۰۴	۳.۳.۱.۸. حل مدل
۳۰۶	۴.۱.۸. خلاصه
۳۰۷	۲.۸. مدل سازی اکسایش آب آشامیدنی
۳۰۷	۱.۲.۸. مدل های شیمیایی و ریاضی
۳۱۱	۲.۲.۸. روش های تعیین غلظت رادیکال هیدروکسیل
۳۱۱	۱.۲.۲.۸. اندازه گیری غیر مستقیم
۳۱۴	۲.۲.۲.۸. مکانیسم واکنش زنجیره ای رادیکال کامل
۳۱۵	۳.۲.۲. روش نیمه تجربی بر مبنای پارامترهای قابل مشاهده
۳۱۷	۴.۲.۲.۸. روش نیمه تجربی بر مبنای سرعت اولیه رادیکال هیدروکسیل
۳۱۹	۵.۲.۲.۸. گزینش پذیری تجربی رباینده ها
۳۲۱	۶.۲.۲.۸. خلاصه ای از مدل های شیمیایی و ریاضی برای آب آشامیدنی
۳۲۱	۳.۲.۸. مدل های حاوی فرایندهای فیزیکی
۳۲۲	۳.۸. مدل سازی اکسایش فاضلاب
۳۲۳	۱.۳.۸. مدل های شیمیایی و ریاضی
۳۳۵	۲.۳.۸. مدل های تجربی
۳۳۶	۳.۳.۸. خلاصه
۳۳۷	۴.۸. توضیح آخر در مورد مدل سازی
۳۴۰	منابع
۳۴۳	فصل نهم: کاربرد ازن در فرایندهای ترکیبی
۳۴۴	۱.۹. فرایندهای اکسایش پیشرفته
۳۴۵	۱.۱.۹. فرایندهای اکسایش پیشرفته شیمیایی
۳۴۵	۱.۱.۱.۹. اصول و اهداف
۳۴۶	۲.۱.۱.۹. فرایندهای موجود
۳۴۹	۳.۱.۱.۹. طراحی آزمایش

۳۵۱	.....	۲.۱.۹	ازن زنی کاتالیستی
۳۵۲	.....	۱.۲.۱.۹	اصول و اهداف
۳۵۴	.....	۲.۲.۱.۹	فرایندهای موجود و پژوهش‌های جاری
۳۵۹	.....	۳.۲.۱.۹	طراحی آزمایش
۳۶۱	.....	۲.۹	سامانه‌های سه فازی
۳۶۲	.....	۱.۲.۹	اصول و اهداف
۳۶۳	.....	۱.۱.۲.۹	سامانه گاز / آب / حلال
۳۶۴	.....	۲.۱.۲.۹	سامانه گاز / آب / جامد
۳۶۵	.....	۲.۲.۹	انتقال جرم در سامانه‌های سه فازی
۳۶۸	.....	۳.۲.۹	فرایندهای موجود و پژوهش‌های جاری
۳۶۸	.....	۱.۳.۲.۹	سامانه‌های گاز / آب / حلال
۳۷۱	.....	۲.۳.۲.۹	سامانه‌های گاز / آب / جامد
۳۷۱	.....	۳.۳.۲.۹	تغییر در مواد جامد
۳۷۵	.....	۴. ۳.۲.۹	تغییر در ترکیبات جذب‌شده بر روی مواد جامد
۳۷۵	.....	۵.۳.۲.۹	ازن زنی خاک
۳۷۷	.....	۶.۳.۲.۹	احیاء جاذب
۳۷۸	.....	۴.۲.۹	طراحی آزمایش
۳۷۸	.....	۱.۴.۲.۹	تعریف سامانه
۳۷۹	.....	۲.۴.۲.۹	انتخاب روش‌های اندازه‌گیری
۳۸۰	.....	۳.۴.۲.۹	تعیین روش آزمایش
۳۸۱	.....	۴.۴.۲.۹	ارزیابی داده‌ها و بررسی نتایج
۳۸۱	.....	۳.۹	فرایندهای شیمیایی - زیستی (CBP)
۳۸۲	.....	۱.۳.۹	اصول و اهداف
۳۸۷	.....	۲.۳.۹	فرایندهای موجود و پژوهش‌های جاری
۳۸۸	.....	۱.۲.۳.۹	کاربردهای آب آشامیدنی
۳۹۱	.....	۲.۲.۳.۹	کاربردهای فاضلاب
۴۰۳	.....	۳.۳.۹	طراحی آزمایش
۴۰۶	.....	۱.۳.۳.۹	تعریف سامانه
۴۱۰	.....	۲.۳.۳.۹	انتخاب روش‌های تحلیلی

۴۱۳	..... تعیین روش تجربی	۳. ۳.۳.۹
۴۱۷	..... ارزیابی داده‌ها	۴.۳.۳.۹
۴۱۷	..... ارزیابی نتایج	۵.۳.۳.۹
۴۲۰	..... کاربردها در صنعت نیمه‌رسانا	۴.۹
۴۲۱	..... مراحل تولید	۱.۴.۹
۴۲۲	..... اصول و اهداف	۲.۴.۹
۴۲۴	..... فرایندهای موجود برای تمیزکردن و اکسایش	۳.۴.۹
۴۲۸	..... طراحی فرایند و یا روش تجربی	۴.۴.۹
۴۲۸	..... ۱. تعریف سامانه	۱.۴.۴.۹
۴۲۸	..... ۲. انتخاب روش‌های اندازه‌گیری	۲.۴.۴.۹
۴۲۸	..... ۳. تعیین روش	۳. ۴.۴.۹
۴۲۹	..... ارزیابی داده‌ها و نتایج	۴.۴.۴.۹
۴۳۰	..... منابع	
۴۴۳	..... علائم اختصاری	
۴۵۵	..... واژه‌نامه	