

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی عمران

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی محیط زیست

# گندزدایی آب خام ورودی به تصفیه خانه آب با استفاده از فناوری میکرو-نانو حباب

نگارنده: نیما ناظران

اساتید راهنما

دکتر سید فضل اله ساغروانی

دکتر معصومه بحرینی

شهریور ماه ۱۴۰۰

شماره: ۵۳۷/۴۴  
 تاریخ: ۱۴۰۰/۷/۲۷  
 ویرایش:

باسمه تعالی  
 گروه‌های ارزشیابی پایان نامه کارشناسی ارشد  
 مربوط به ورودی‌های ۹۴ به بعد



فرم شماره (۳) صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد آقای نیما نظران با شماره دانشجویی ۹۷۱۶۳۵۴ رشته مهندسی عمران گرایش مهندسی محیط زیست تحت عنوان گندزدایی آب خام ورودی به تصفیه‌خانه آب با استفاده از فناوری میکرو-نانو حباب که در تاریخ ۱۴۰۰/۰۶/۱۶ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار شد به شرح ذیل اعلام می‌گردد:

الف) درجه عالی:  شماره ۱۹-۲۰  
 ب) درجه خیلی خوب:  شماره ۱۸-۱۸/۹۹  
 ج) درجه خوب:  شماره ۱۶-۱۷/۹۹  
 د) درجه متوسط:  شماره ۱۴-۱۵/۹۹  
 ه) کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول و نیاز به دفاع مجدد دارد   
 نوع تحقیق:  نظری  عملی

اعضاء	مرتبه علمی	نام و نام خانوادگی	عضو هیأت داوران
	دانشیار	دکتر سید فضل اله ساغروانی	۱- استاد راهنمای اول
	استادیار	دکتر معصومه بحرینی	۲- استاد راهنمای دوم
			۳- استاد مشاور
	استادیار	دکتر رمضان واقعی	۴- استاد داور اول
	دانشیار	دکتر مهدی میرزایی	۵- استاد داور دوم
	استادیار	دکتر محسن کرامتی	۶- نماینده تحصیلات تکمیلی

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده:  
 تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:

تقدیم به

پدر و مادر مهربانم که بدون حمایت و دگرگرمی ایشان

انجام این پژوهش ممکن نبود.

# شکر و قدردانی

خداوند منان را شاکرم که توفیق ادامه تحصیل در مقطع کارشناسی ارشد را نصیبم فرمود تا از اساتید ارزشمند و ارجمندی چون آقایان دکتر سید فضل اله ساغروانی، دکتر رمضان واقعی و سرکار خانم دکتر معصومه بحرینی و دکتر بهناز دهر آرزما کسب فیض نمایم. آنان که در کمال تواضع و فروتنی، ذره‌ای از دانش خود را دریغ نکردند. از جناب آقای دکتر ساغروانی و سرکار خانم دکتر بحرینی که راهنمایی اینجانب را برای انجام این پایان نامه بر عهده گرفتند، نهایت سپاس گزاری را دارم که بی‌شک بدون حمایت و هدایت‌های بیکرانشان، به سرانجام رسانیدن این پایان نامه را ناممکن می‌نمود. از شرکت محترم آب و فاضلاب مشهد، جهت حمایت مالی از پایان نامه، کمال تشکر را دارم. از جناب آقای مهندس محمود سلطانی، مدیر امور تصفیه خانه‌های آب مشهد، جناب آقای مهندس حسین حقیقی، سرپرست تصفیه خانه شماره ۳ آب مشهد و گروه تحقیقات و فناوری شرکت آب و فاضلاب مشهد، جهت حمایت و همکاری‌های خالصانه، صمیمانه سپاس گزارم. همچنین از کارشناسان محترم آزمایشگاه شرکت آب و فاضلاب مشهد، سرکار خانم مهندس افتخاری و رستی و نیز کارشناس محترم آزمایشگاه دانشکده علوم دانشگاه فردوسی مشهد، سرکار خانم زهرا خرم‌جهت حمایت‌های بی‌دریغشان نهایت تشکر را دارم.

# تعمدنامه

اینجانب نیما ناظران دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی محیط‌زیست دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان‌نامه گندزدایی آب خام ورودی به تصفیه‌خانه آب با استفاده از فناوری میکرو-نانو حباب تحت راهنمایی جناب آقای دکتر سید فضل اله ساغروانی و سرکار خانم دکتر معصومه بحرینی متعهد می‌شوم.

- تحقیقات در این پایان‌نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان‌نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان‌نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان‌نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

## تاریخ

### امضای دانشجو

#### مالکیت نتایج و حق نشر

کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه‌های رایانه‌ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود. استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان‌نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

# چکیده

امروزه کاهش منابع آبی و آلودگی آن‌ها باعث شده است تا تصفیه آب با بیشترین بازدهی و کمترین هزینه برای تأمین آب شرب، ضرورت پیدا کند. یکی از مهم‌ترین منابع تأمین آب شرب، آب ذخیره شده در مخزن سدها است که با داشتن پارامترهای آلودگی متنوع، بر کیفیت آب تأثیر می‌گذارند. از جمله مهم‌ترین آلودگی‌های آب خام مخزن سدها می‌توان به آلودگی‌های میکروبی و وجود ریزموجودات از جمله جلبک‌ها اشاره نمود. از همین رو، دستیابی به کارآیی حداکثر در تصفیه منابع آب، استفاده از فناوری‌های نوین مانند فناوری میکرو-نانو حباب (میناب) را ضروری نموده است. برای بررسی تأثیر فناوری میناب در حذف و کاهش طیف‌های مختلف از ریزموجودات و تغییر جمعیت باکتریایی آب موجود در مخزن سدها، آب خام ورودی به تصفیه‌خانه، بدون انجام هیچ‌گونه عملیات پیش‌تصفیه، پس از ورود به مولد میناب با تزریق هم‌زمان گازهای هوا، اکسیژن و ازن و ترکیبی از گازهای هوا و ازن، در زمان‌های مختلف مورد آزمایش قرار گرفته است. از جمله محدودیت‌های پژوهش، می‌توان به امکان‌پذیر نبودن کنترل کیفیت آب خام ورودی به حوضچه آزمایش با توجه به انجام آزمایش در روزهای مختلف سال و احتمال تغییر در بار میکروبی اشاره نمود. مهم‌ترین اهداف از انجام این آزمایش‌ها، تعیین تأثیر نوع گاز تزریقی (هوا، اکسیژن و ازن)، مقدار گاز تزریقی و مدت زمان لازم در کاهش ریزموجودات و بار میکروبی بوده است. به این منظور، با تغییر مدت زمان تزریق هر یک از گازها، پارامترهای کیفی آب، شناسایی و شمارش تعداد ریزموجودات، میزان بار میکروبی به روش شمارش باکتری‌های هتروتروف، عکس‌برداری با میکروسکوپ الکترونی، آنالیز اندازه میکرو-نانو حباب‌ها، اندازه‌گیری پتانسیل زتا و اندازه‌گیری غلظت و زمان ماند ازن در آب، انجام شده است. پژوهش حاضر نشان داد که میکرو-نانو حباب ازن در حذف و کاهش تمام گونه‌های شناسایی شده از

ریزموجودات، بالاترین بازدهی و کارایی را دارد و موجب کاهش ۶۸ تا ۱۰۰ درصدی آن‌ها در مدت زمان ۱۸۰ دقیقه‌ای تزریق، شده است. علاوه بر این، مشخص شد استفاده از میکرو-نانو حباب‌های هوا، اکسیژن و ازن در مدت زمان ۳۰ دقیقه و نیز ترکیب میناب هوا و ازن در مدت زمان ۶۰ دقیقه، بیشترین نرخ کاهش ریزموجودات را به همراه دارد و از این نقطه نظر می‌تواند صرفه اقتصادی قابل توجهی داشته باشد. در مورد حذف باکتری‌های هتروتروف، ترکیب میکرو-نانو حباب هوا و ازن در مدت زمان ۶۰ دقیقه با کاهش ۰/۷۴ لگاریتمی (معادل ۸۱ درصد)، بالاترین بازدهی و توجیه اقتصادی را دارد. به طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از میکرو-نانو حباب‌ها در آب خام، موجب حذف مقدار قابل توجهی از انواع ریزموجودات و بار میکروبی شده و می‌تواند استفاده از مواد مصرفی در مراحل بعدی تصفیه آب، از جمله منعقدکننده‌ها را کاهش دهد و از اختلال در فرآیند فیلتراسیون نیز جلوگیری کند.

**کلمات کلیدی:** تصفیه آب، میکرو-نانو حباب، ریزموجودات، باکتری‌های هتروتروف، گندزدایی

# لیست مقالات مستخرج از پایان نامه

۱- ناظران ن، ساغروانی ف، بحرینی م، "تأثیر فناوری میکرو-نانو حباب بر باکتری‌های هتروتروف در آب خام ورودی به تصفیه‌خانه آب"، دوازدهمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

# فهرست مطالب

ع فهرست جداول

ف فهرست اشکال

۱ فصل ۱: کلیات

۱-۱ مقدمه..... ۲

۱-۲ ضرورت انجام پژوهش..... ۳

۱-۳ اهداف پژوهش..... ۳

۱-۴ روش انجام پژوهش..... ۴

۱-۵ معرفی فصل‌های پایان‌نامه..... ۵

۷ فصل ۲: مروری بر مطالعات پیشین

۲-۱ مقدمه..... ۸

۲-۲ هوادهی و سیستم‌های تماس گاز-مایع..... ۸

۲-۳ روش‌های گندزدایی آب و فاضلاب..... ۹

۲-۴ میکرو-نانو حباب‌ها..... ۱۲

۲-۴-۱ ویژگی میکرو-نانو حباب‌ها..... ۱۳

- ۲-۴-۲ روش‌های تولید میکرو-نانو حباب‌ها ..... ۱۶
- ۲-۴-۳ کاربرد فناوری میکرو-نانو حباب ..... ۱۹
- ۲-۵ بررسی گندزدایی آب و فاضلاب با استفاده از مواد گندزدا ..... ۲۳
- ۲-۶ بررسی گندزدایی آب و فاضلاب با استفاده از فناوری میکرو-نانو حباب ..... ۲۶
- ۲-۷ جمع‌بندی ..... ۳۰

### فصل ۳: مواد و روش‌ها

- ۳۱
- ۳-۱ مقدمه ..... ۳۲
- ۳-۲ فعالیتهای میدانی ..... ۳۲
- ۳-۲-۱ آماده‌سازی تجهیزات در محل نمونه‌گیری ..... ۳۲
- ۳-۲-۲ آب‌گیری حوضچه ..... ۳۳
- ۳-۲-۳ مولد میکرو-نانو حباب ..... ۳۴
- ۳-۲-۴ مولد ازن‌ساز ..... ۳۴
- ۳-۳ نمونه‌گیری ..... ۳۵
- ۳-۴ فعالیتهای آزمایشگاهی ..... ۳۶
- ۳-۴-۱ اندازه‌گیری پارامترهای کیفی آب ..... ۳۶
- ۳-۴-۲ شناسایی و شمارش تعداد ریزموجودات ..... ۳۸

- ۳-۴-۳ شمارش تعداد باکتری‌های هتروتروف (HPC) ..... ۴۰
- ۳-۴-۴ شناسایی اولیه باکتری‌ها ..... ۴۳
- ۳-۴-۵ انجام آزمایش SEM (Scanning Electron Microscope) ..... ۴۴
- ۳-۴-۶ آنالیز اندازه ذرات ..... ۴۵
- ۳-۴-۷ اندازه‌گیری پتانسیل زتا ..... ۴۶
- ۳-۴-۸ اندازه‌گیری غلظت و زمان ماند ازن در آب ..... ۴۷
- ۳-۵ جمع‌بندی ..... ۴۸

#### فصل ۴: نتایج و بحث ۴۹

- ۴-۱ مقدمه ..... ۵۰
- ۴-۲ بررسی پارامترهای کیفی آب ..... ۵۰
- ۴-۳ بررسی توزیع اندازه میکرو-نانو حباب‌ها ..... ۵۲
- ۴-۴ بررسی پتانسیل زتا در میکرو-نانو حباب‌ها ..... ۵۳
- ۴-۵ شناسایی ریزموجودات ..... ۵۶
- ۴-۶ تأثیر میکرو-نانو حباب‌ها بر تعداد ریزموجودات ..... ۶۳
- ۴-۶-۱ اثر میکرو-نانو حباب‌های هوا بر تعداد ریزموجودات ..... ۶۳
- ۴-۶-۲ اثر میکرو-نانو حباب‌های اکسیژن بر تعداد ریزموجودات ..... ۶۶

- ۴-۶-۳ اثر میکرو-نانو حباب‌های ازن بر تعداد ریزموجودات..... ۶۹
- ۴-۶-۴ اثر ترکیب میکرو-نانو حباب‌های هوا و ازن بر تعداد ریزموجودات..... ۷۳
- ۴-۶-۵ مقایسه تأثیر تزریق گازهای مختلف به آب خام در کاهش تعداد جلبک‌های سبز... ۷۶
- ۴-۶-۶ مقایسه تأثیر تزریق گازهای مختلف به آب خام در کاهش تعداد جلبک‌های سبز-آبی ۷۷
- ۴-۶-۷ مقایسه تأثیر تزریق گازهای مختلف به آب خام در کاهش تعداد داینوفیتاها..... ۷۹
- ۴-۶-۸ مقایسه تأثیر تزریق گازهای مختلف به آب خام در کاهش تعداد دیاتومه‌ها..... ۸۰
- ۴-۶-۹ مقایسه تأثیر تزریق گازهای مختلف به آب خام در کاهش تعداد نماتودها..... ۸۱
- ۴-۶-۱۰ مقایسه تأثیر تزریق گازهای مختلف به آب خام در کاهش تعداد روتیفرها..... ۸۳
- ۴-۶-۱۱ مقایسه تأثیر تزریق گازهای مختلف به آب خام در کاهش تعداد کراستاسه‌ها..... ۸۴
- ۴-۷ تحلیل آزمایش SEM..... ۸۵
- ۴-۸ تأثیر میکرو-نانو حباب‌ها بر تعداد باکتری‌های هتروتروف..... ۸۸
- ۴-۸-۱ اثر میکرو-نانو حباب‌های هوا بر تعداد باکتری‌های هتروتروف..... ۸۸
- ۴-۸-۲ اثر میکرو-نانو حباب‌های اکسیژن بر تعداد باکتری‌های هتروتروف..... ۸۹
- ۴-۸-۳ اثر میکرو-نانو حباب‌های ازن بر تعداد باکتری‌های هتروتروف..... ۹۰
- ۴-۸-۴ اثر ترکیب میکرو-نانو حباب‌های هوا و ازن بر تعداد باکتری‌های هتروتروف..... ۹۱

۴-۸-۵ مقایسه تأثیر تزریق گازهای مختلف به آب خام در کاهش تعداد باکتری‌های

هتروتروف ..... ۹۲

۴-۹ شناسایی اولیه باکتری‌ها ..... ۹۳

۴-۱۰ تعیین غلظت و زمان ماند ازن در آب ..... ۹۴

۴-۱۱ جمع بندی ..... ۹۵

## فصل ۵: نتیجه‌گیری و پیشنهادها

۹۷

۵-۱ مقدمه ..... ۹۸

۵-۲ جمع‌بندی نتایج پارامترهای کیفی آب ..... ۹۸

۵-۳ جمع‌بندی نتایج توزیع اندازه میکرو-نانو حباب‌ها ..... ۹۸

۵-۴ جمع‌بندی نتایج اندازه‌گیری پتانسیل زتا ..... ۹۸

۵-۵ جمع‌بندی نتایج شناسایی ریزموجودات و تأثیر میکرو-نانو حباب‌ها بر تعداد ریزموجودات ..... ۹۹

۵-۶ جمع‌بندی نتایج آزمایش SEM ..... ۱۰۱

۵-۷ جمع‌بندی نتایج تأثیر میکرو-نانو حباب‌ها بر تعداد باکتری‌های هتروتروف ..... ۱۰۱

۵-۸ جمع‌بندی نتایج تعیین غلظت و زمان ماند ازن در آب ..... ۱۰۲

۵-۹ نتیجه‌گیری کلی ..... ۱۰۲

۵-۱۰ پیشنهاد پژوهش‌های آتی ..... ۱۰۳



# فهرست جداول

جدول ۱-۴: پارامترهای کیفی آب خام و میناب هوا ..... ۵۱

جدول ۲-۴: پارامترهای کیفی آب خام و میناب اکسیژن ..... ۵۱

جدول ۳-۴: پارامترهای کیفی آب خام و میناب ازن ..... ۵۱

جدول ۴-۴: پارامترهای کیفی آب خام و ترکیب میناب هوا و ازن ..... ۵۱

# فهرست اشکال

- شکل ۱-۲: شماتیک بالا آمدن حباب معمولی، میکرو حباب و نانو حباب به سطح آب ..... ۱۲
- شکل ۲-۲: محدوده اندازه ذرات حباب‌ها و ویژگی‌های حباب‌ها ..... ۱۳
- شکل ۳-۲: توزیع یون‌ها در نزدیکی سطح گاز-آب در محلول آبی NaCl و تشکیل لایه دو تایی الکتریکی ..... ۱۶
- شکل ۱-۳: طرح شماتیک سامانه نصب شده در محل تصفیه‌خانه ..... ۳۳
- شکل ۲-۳: نصب و لوله کشی تجهیزات در نزدیکی حوضچه مورد نظر ..... ۳۳
- شکل ۳-۳: مولد میکرو-نانو حباب ..... ۳۴
- شکل ۴-۳: تزریق گاز از نوسط مولد از ن‌ساز به مولد میکرو-نانو حباب ..... ۳۵
- شکل ۵-۳: میکرو-نانو حباب‌های تولیدی در آب (الف) نمای دور و (ب) نمای نزدیک ..... ۳۶
- شکل ۶-۳: دستگاه کدورت‌سنج ..... ۳۷
- شکل ۷-۳: (الف) دستگاه اندازه‌گیری pH (ب) دستگاه اندازه‌گیری EC و TDS ..... ۳۷
- شکل ۸-۳: پمپ خلأ و فیلتر فلاسک ..... ۳۸
- شکل ۹-۳: (الف) فیلتر غشائی ۰/۴۵ میکرون (ب) فیلتر غشائی بر روی فیلتر فلاسک ..... ۳۹
- شکل ۱۰-۳: (الف) لام سدویک رفته (ب) میکروسکوپ نوری ..... ۴۰
- شکل ۱۱-۳: (الف) محلول محیط کشت Plate Count Agar (ب) محیط کشت‌های آماده شده در پلیت‌ها ..... ۴۱
- شکل ۱۲-۳: نمونه‌های رقیق شده ..... ۴۲
- شکل ۱۳-۳: کلنی‌های تشکیل شده بر روی محیط کشت ..... ۴۲

- شکل ۳-۱۴: میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) ..... ۴۵
- شکل ۳-۱۵: دستگاه آنالیز اندازه ذرات ..... ۴۶
- شکل ۳-۱۶: دستگاه اندازه‌گیری پتانسیل زتا ..... ۴۷
- شکل ۳-۱۷: (الف) دستگاه ازن‌متر (ب) قرص معرف DPD 4 ..... ۴۸
- شکل ۴-۱: توزیع اندازه میکرو-نانو حباب اکسیژن بر اساس (الف) تعداد ..... ۵۲
- شکل ۴-۲: تغییرات پتانسیل زتای (الف) آب خام (pH=8) و (ب) آب دارای میکرو-نانو حباب اکسیژن (pH=8.04) ..... ۵۴
- شکل ۴-۳: تغییرات تحرک‌پذیری ذرات در (الف) آب خام (pH=8) و (ب) آب دارای میکرو-نانو حباب اکسیژن (pH=8.04) ..... ۵۵
- شکل ۴-۴: (الف) و (ب) جلبک سبز *Pediastrum* (پ) جلبک سبز *Tetraedron* ..... ۵۷
- شکل ۴-۵: جلبک سبز-آبی *phormidium* ..... ۵۸
- شکل ۴-۶: گونه *Ceratium* شناسایی شده در آب ..... ۵۹
- شکل ۴-۷ (الف) دیاتومه *Synedra* (ب) دیاتومه *Tabellaria* ..... ۶۰
- شکل ۴-۸: (الف) و (ب) نماتودهای شناسایی شده در آب خام ..... ۶۱
- شکل ۴-۹: (الف) و (ب) گونه *Keratella* شناسایی شده در آب خام ..... ۶۱
- شکل ۴-۱۰: (الف) و (ب) کراستاسه‌های راسته Copepoda در آب خام ..... ۶۲
- شکل ۴-۱۱: تراکم سلولی ریزموجودات (الف) قبل از تزریق میناب ازن (ب) پس از تزریق میناب ازن ..... ۶۳
- شکل ۴-۱۲: نمودار میانگین تعداد ریزموجودات در هر میلی‌لیتر برای آب خام در مقایسه با آب دارای میناب هوا در زمان‌های ۳۰، ۶۰، ۱۲۰ و ۱۸۰ دقیقه (الف) جلبک سبز؛ (ب) جلبک سبزآبی؛ (پ) داینوفیتا؛ (ت) دیاتومه؛ (ث) نماتود؛ (ج) روتیفر و (چ) کراستاسه ..... ۶۴

شکل ۴-۱۳: نمودار میانگین تعداد ریزموجودات در هر میلی‌لیتر برای آب خام در مقایسه با آب دارای میناب اکسیژن در زمان‌های ۳۰، ۶۰، ۱۲۰ و ۱۸۰ دقیقه (الف) جلبک سبز؛ (ب) جلبک سبزآبی؛ (پ) داینوفیتا؛ (ت) دیاتومه؛ (ث) نماتود؛ (ج) روتیفر و (چ) کراستاسه ..... ۶۷

شکل ۴-۱۴: نمودار میانگین تعداد ریزموجودات در هر میلی‌لیتر برای آب خام در مقایسه با آب دارای میناب ازن در زمان‌های ۳۰، ۶۰، ۱۲۰ و ۱۸۰ دقیقه (الف) جلبک سبز؛ (ب) جلبک سبزآبی؛ (پ) داینوفیتا؛ (ت) دیاتومه؛ (ث) نماتود؛ (ج) روتیفر و (چ) کراستاسه ..... ۷۰

شکل ۴-۱۵: نمودار میانگین تعداد ریزموجودات در هر میلی‌لیتر برای آب خام در مقایسه با آب دارای میناب هوا و ازن در زمان ۶۰ دقیقه (الف) جلبک سبز؛ (ب) جلبک سبزآبی؛ (پ) داینوفیتا؛ (ت) دیاتومه؛ (ث) نماتود؛ (ج) روتیفر و (چ) کراستاسه ..... ۷۴

شکل ۴-۱۶: نمودار مقایسه درصد کاهش تعداد جلبک‌های سبز با زمان برای آب دارای میناب هوا (WA)، اکسیژن (WOX)، ازن (WOZ) و ترکیب هوا و ازن (WAZ) نسبت به آب خام ..... ۷۷

شکل ۴-۱۷: نمودار مقایسه درصد کاهش تعداد جلبک‌های سبز-آبی با زمان برای آب دارای میناب هوا (WA)، اکسیژن (WOX)، ازن (WOZ) و ترکیب هوا و ازن (WAZ) نسبت به آب خام ..... ۷۸

شکل ۴-۱۸: نمودار مقایسه درصد کاهش تعداد داینوفیتاها با زمان برای آب دارای میناب هوا (WA)، اکسیژن (WOX)، ازن (WOZ) و ترکیب هوا و ازن (WAZ) نسبت به آب خام ..... ۸۰

شکل ۴-۱۹: نمودار مقایسه درصد کاهش تعداد دیاتومه‌ها با زمان برای آب دارای میناب هوا (WA)، اکسیژن (WOX)، ازن (WOZ) و ترکیب هوا و ازن (WAZ) نسبت به آب خام ..... ۸۱

شکل ۴-۲۰: نمودار مقایسه درصد کاهش تعداد نماتودها با زمان برای آب دارای میناب هوا (WA)، اکسیژن (WOX)، ازن (WOZ) و ترکیب هوا و ازن (WAZ) نسبت به آب خام ..... ۸۲

شکل ۴-۲۱: نمودار مقایسه درصد کاهش تعداد روتیفرها با زمان برای آب دارای میناب هوا (WA)، اکسیژن (WOX)، ازن (WOZ) و ترکیب هوا و ازن (WAZ) نسبت به آب خام ..... ۸۴

شکل ۴-۲۲: نمودار مقایسه درصد کاهش تعداد کراستاسه‌ها با زمان برای آب دارای میناب هوا (WA)، اکسیژن (WOX)، ازن (WOZ) و ترکیب هوا و ازن (WAZ) نسبت به آب خام ..... ۸۵

شکل ۴-۲۳: تصویر تراکم سلولی ریزموجودات به دست آمده از آزمون SEM (الف) آب خام و (ب) آب دارای میناب ازن ..... ۸۶

شکل ۴-۲۴: تخریب سلولی دیاتومه‌های مختلف در مدت زمان ۶۰ دقیقه به وسیله میناب‌های مختلف (الف) دیاتومه *Achnanthydium* با میناب هوا؛ (ب) دیاتومه *Cyclotella* با میناب اکسیژن و ..... ۸۷

شکل ۴-۲۵: نمودار لگاریتمی میانگین تعداد کلنی‌های تشکیل شده در هر میلی‌لیتر برای آب خام در مقایسه با آب دارای میناب هوا در زمان‌های ۳۰، ۶۰، ۱۲۰ و ۱۸۰ دقیقه ..... ۸۹

شکل ۴-۲۶: نمودار لگاریتمی میانگین تعداد کلنی‌های تشکیل شده در هر میلی‌لیتر برای آب خام در مقایسه با آب دارای میناب اکسیژن در زمان‌های ۳۰، ۶۰، ۱۲۰ و ۱۸۰ دقیقه ..... ۹۰

شکل ۴-۲۷: نمودار لگاریتمی میانگین تعداد کلنی‌های تشکیل شده در هر میلی‌لیتر برای آب خام در مقایسه با آب دارای میناب ازن در زمان‌های ۳۰، ۶۰، ۱۲۰ و ۱۸۰ دقیقه ..... ۹۱

شکل ۴-۲۸: نمودار لگاریتمی میانگین تعداد کلنی‌های تشکیل شده در هر میلی‌لیتر برای آب خام در مقایسه با آب دارای میناب هوا و ازن در زمان ۶۰ دقیقه ..... ۹۲

شکل ۴-۲۹: نمودار مقایسه درصد کاهش تعداد باکتری‌های هتروتروف با زمان برای آب دارای میناب هوا (WA)، اکسیژن (WOX)، ازن (WOZ) و ترکیب هوا و ازن (WAZ) نسبت به آب خام ..... ۹۳

شکل ۴-۳۰: (الف) باکتری‌های باسیل گرم منفی (ب) باکتری‌های کوکسی گرم مثبت ..... ۹۴

شکل ۴-۳۱: نمودار مقایسه غلظت و زمان ماند ازن در آب دارای میناب ازن در زمان‌های ۳۰ و ۶۰ دقیقه پس از تزریق میناب ازن ..... ۹۵

# فصل ۱: کلیات

## ۱-۱ مقدمه

امروزه با پیشرفت جوامع و رشد صنایع مختلف و نیز افزایش جمعیت، دسترسی و نیاز به منابع آبی با کیفیت برای تأمین آب شرب ضرورت پیدا کرده است. از طرفی با توجه به آلودگی‌های زیست‌محیطی و کاهش منابع آبی، استفاده بهینه از منابع آبی و تصفیه آن‌ها، بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته است. تصفیه‌ی آب شامل مراحل و فرآیندهای گوناگونی است که یکی از ابتدایی‌ترین و اساسی‌ترین مراحل، فرآیند گندزدایی و هوادهی با استفاده از گازهای گوناگون است که می‌تواند در چندین مرحله انجام پذیرد. فرآیند گندزدایی با روش‌های مختلفی مانند استفاده از گازهای کلر و ازن، اشعه‌ی فرابنفش و... انجام می‌گیرد [۱].

از گذشته، پژوهشگران روش‌های گوناگونی را برای تصفیه و گندزدایی آب، مورد بررسی قرار داده‌اند. امروزه با توجه به گسترش شدید آلودگی منابع آبی و رشد ریزموجودات<sup>۱</sup> در منابع آبی از جمله آب موجود در مخزن سدها و نیز پیشرفت روز افزون فناوری، روش‌های جدیدی جهت تصفیه و گندزدایی آب و نیز کاهش هزینه‌های فرآیند تصفیه، مورد توجه قرار گرفته است. یکی از فناوری‌های نوین در تصفیه‌ی آب و فاضلاب، فناوری میکرو-نانو حباب<sup>۲</sup> (میناب) است.

با مطالعه‌ی مقالات و پژوهش‌های انجام شده در مورد گندزدایی آب خام، احساس شد که استفاده از فناوری میناب کم‌تر مورد توجه قرار گرفته است. از آن‌جا که حباب‌های تولید شده می‌توانند در زمانی کوتاه و با راندمانی بالا، موجب کاهش شدید میزان آلودگی شوند، استفاده از فناوری میناب در سال‌های اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته است.

پژوهش حاضر پیرامون «گندزدایی آب خام ورودی به تصفیه‌خانه آب با استفاده از فناوری میکرو-نانو حباب» است. در این پژوهش با استفاده از مولد میکرو-نانو حباب در مراحل جداگانه، گازهای هوا،

---

<sup>۱</sup>Microorganisms

<sup>۲</sup>Micro-Nano Bubble

اکسیژن، ازن و ترکیب هوا و ازن به آب خام تزریق شده است و نتایج به دست آمده از کاهش یا حذف ریزموجودات و بار میکروبی، مورد بررسی قرار گرفته است. ذکر این نکته ضروری است که آب خام پس از ورود به تصفیه‌خانه آب، بدون انجام هیچ‌گونه عمل پیش‌تصفیه‌ای مورد آزمایش قرار گرفته است.

## ۱-۲ ضرورت انجام پژوهش

در سال‌های اخیر با توجه به کاهش منابع آب زیرزمینی، استفاده از آب مخزن سدها برای مصارف خانگی و آشامیدنی افزایش یافته است. استفاده بی‌رویه از کودهای کشاورزی، تغییرات آب و هوایی، گسترش فعالیت‌های صنعتی و افزایش قابل ملاحظه مواد آلی در آب‌های جاری، از جمله دلایلی است که موجب افزایش فعالیت‌های زیستی و در نتیجه افزایش شدید بار میکروبی و آلودگی آب شده است. از سوی دیگر برای کاهش بار آلودگی، توجه به مواد گندزدای کم‌خطر مانند ازن افزایش یافته و نیاز به هوادهی و گندزدایی آب آشامیدنی با روش‌های جدید و اقتصادی ضرورت پیدا کرده است. فناوری میکرو-نانو حباب (میناب) یک فناوری نوین است که می‌تواند ضمن کاهش شدید مصرف ازن، کارایی گندزدایی با این گاز را افزایش دهد. از آنجا که ثابت شده است فناوری میناب توانایی بسیار بالایی در کاهش گاز مصرفی در فعالیت‌های تزریق گاز به آب را دارد، پیش‌بینی می‌شود که بتوان آب ورودی به تصفیه‌خانه آب را با مصرف گاز کمتر و کارایی بالاتر گندزدایی کرد.

## ۱-۳ اهداف پژوهش

کلی‌ترین اهداف پژوهش حاضر این است که چه طیف یا طیف‌هایی از ریز موجودات از جمله جلبک‌ها را می‌توان با تزریق میناب حذف کرد و تزریق میناب چه اثری بر کاهش بار میکروبی آب دارد. در این پژوهش برای نیل به اهداف اصلی، اهداف جزئی زیر مد نظر گرفته شده است:

- ✓ تأثیر نوع گاز تزریقی (هوا، اکسیژن و ازن) در کاهش ریزموجودات و بار میکروبی
- ✓ تعیین مقدار گاز تزریقی و مدت زمان لازم برای رسیدن به سطح گندزدایی مناسب
- ✓ مدت زمان ماند محلول ازن در آب

## ۱-۴ روش انجام پژوهش

در این پایان‌نامه از دیدگاه عملی و آزمایشگاهی به بررسی و آزمایش آب خام ورودی به تصفیه‌خانه آب، پرداخته شده است. در این پژوهش، فرآیند تصفیه و گندزدایی آب خام، با تزریق گازهای هوا، اکسیژن، ازن و ترکیب هوا و ازن، با استفاده از مولد میکرو-نانو حباب در زمان‌های مختلف انجام شده است. به این منظور، ابتدا آب خام ورودی به تصفیه‌خانه آب، بدون هیچ‌گونه فرآیند پیش‌تصفیه‌ای به حوضچه‌ای هدایت شده است. سپس آب داخل حوضچه با دبی معین، به مولد میکرو-نانو حباب نصب شده در محل، وارد شده و پس از تزریق هم‌زمان گاز مصرفی به آب با استفاده از مولد میناب، آب خام در زمان‌های مختلف گندزدایی شده و آب خروجی از مولد میناب مورد بررسی و آزمایش قرار گرفته است. در ادامه نیز، آزمایش پارامترهای کیفی آب، شناسایی و شمارش تعداد ریزموجودات، میزان بار میکروبی به روش شمارش باکتری‌های هتروتروف (HPC)، آزمایش<sup>۲</sup> SEM، آنالیز اندازه میکرو-نانو حباب‌ها، اندازه‌گیری پتانسیل زتا و اندازه‌گیری غلظت و زمان ماند ازن در آب، انجام شده است.

## ۱-۵ تعیین حدود پژوهش

انجام هر پژوهشی، همواره با محدودیت‌ها و فرضیاتی همراه است که توجه به آن‌ها موجب به دست آمدن نتایج و تفسیر دقیق‌تری از پژوهش خواهد شد. در این پژوهش نیز، همانند دیگر پژوهش‌های

---

<sup>۱</sup>Heterotrophic Plate Count

<sup>۲</sup>Scanning Electron Microscope

آزمایشگاهی و میدانی، محدودیت‌هایی وجود داشت که خارج از کنترل پژوهشگر بود. از جمله این محدودیت‌ها، می‌توان به عدم کنترل کیفیت آب خام ورودی به تصفیه‌خانه آب اشاره نمود. با توجه به این‌که پژوهش حاضر در روزهای مختلفی از سال انجام شده است، احتمال تغییر در کیفیت آب خام ورودی و بار میکروبی وجود داشته است. همچنین با توجه به این‌که دبی آب خام ورودی به فرآیندهای اصلی تصفیه‌خانه و دبی آب خام ورودی به حوضچه مورد آزمایش، اختلاف قابل توجهی با یکدیگر داشته است و نیز عدم استفاده متوالی از ازن در فرآیند اصلی پیش‌تصفیه در تصفیه‌خانه آب، مقایسه نتایج تزریق میناب‌های مختلف به آب خام در پژوهش حاضر با نتایج تزریق ازن به آب در روش مرسوم مورد استفاده در تصفیه‌خانه آب، امکان‌پذیر نبوده است. به این ترتیب باید توجه داشت که در گزارش نتایج به دست آمده، این محدودیت‌ها نیز اثرگذار بوده‌اند.

## ۱-۶ معرفی فصل‌های پایان‌نامه

پژوهش حاضر در بخش‌های ذیل سازمان‌بندی شده است:

### فصل اول: کلیات

در فصل اول مفاهیم اصلی و هدف فناوری میکرو-نانو حباب، ضرورت انجام پژوهش، اهداف پژوهش، روش انجام پژوهش و روند بررسی پژوهش شرح داده شده است.

### فصل دوم: مروری بر مطالعات پیشین

در فصل دوم به بررسی مطالعات پیشین صورت گرفته توسط پژوهشگران مختلف پیرامون موضوعات مورد بحث، پرداخته شده است.

### فصل سوم: مواد و روش‌ها

در فصل سوم روش انجام پژوهش و دستگاه‌های مورد استفاده و آزمایش‌های انجام شده به تفصیل شرح داده شده است.

فصل چهارم: نتایج و بحث

در فصل چهارم به بررسی و تحلیل نتایج آزمایش‌های انجام شده، پرداخته شده است.

فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در فصل پنجم، نتیجه‌گیری کلی به دست آمده از نتایج آزمایش‌های انجام شده و نیز پیشنهادهایی

برای پژوهش‌های آینده ارائه شده است.

## فصل ۲ : مروری بر مطالعات پیشین

## ۲-۱ مقدمه

گسترش آلودگی‌های آب و فاضلاب و رشد بیش از حد ریزموجودات زنده نظیر باکتری‌ها، جلبک‌ها موجب شده است تا گندزدایی آب و فاضلاب با استفاده از روش‌های گوناگون اهمیت پیدا کند و پژوهشگران نیز با استفاده از فناوری‌های نوین، روش‌های کارآمدتری را برای تصفیه و گندزدایی آب و فاضلاب پیشنهاد کنند. در این فصل به پژوهش‌های انجام شده در گذشته در مورد تصفیه و گندزدایی آب و فاضلاب پرداخته شده است.

## ۲-۲ هوادهی و سیستم‌های تماس‌گاز-مایع

هوادهی یکی از مهم‌ترین فرآیندها در تصفیه‌ی آب و فاضلاب به شمار می‌رود. از هوادهی می‌توان برای خارج ساختن گازهای نامطبوع محلول در آب (گاززدایی) یا افزودن اکسیژن به آب برای تبدیل مواد نامطلوب به شکلی مناسب‌تر (اکسیداسیون) استفاده نمود [۱]. در تصفیه‌ی آب، هوادهی برای تصفیه و گندزدایی آب‌های زیرزمینی و آب مخزن سدها کاربرد دارد.

آب مخزن سدها با گذشت زمان‌های طولانی و ساکن ماندن آب و عدم نفوذ نور به لایه‌های زیرین و همچنین کاهش اکسیژن محلول در آب، موجب تغییر بو، طعم و رنگ آب می‌شود که نتیجه‌ی رشد جلبک‌ها، باکتری‌ها و ویروس‌ها است. بدین منظور اهمیت هوادهی آب مخزن سدها برای مصرف آب آشامیدنی مورد توجه خواهد بود.

سیستم‌های تماس‌گاز-مایع برای ایجاد تعادل در مخلوط گاز و آب با سرعت بیشتر برای انجام گاززدایی و فراهم نمودن اکسیژن فوق اشباع به منظور اکسیداسیون طراحی می‌شوند. هنگامی که آب درون هوا پخش می‌شود، با حداقل کردن اندازه‌ی قطره، سطح تماس میان گاز و مایع در حجم معینی از آب افزایش می‌یابد. در تصفیه‌خانه‌های آب، سیستم‌های آب در هوا ممکن است شامل فواره‌ها، برج‌های سینی‌دار یا برج‌های آبخاری باشند [۱].

روش دیگر هوادهی آب، پخش هوا در داخل آب است. جذب و یا دفع گاز با به حداکثر رساندن مساحت سطح مشترک، یا به عبارتی به حداقل رساندن اندازه‌ی حباب هوا، انجام می‌گیرد. سیستم‌های هوا در آب غالباً از تانک‌های با عمق ۲ تا ۵ متر که در آن جریان‌های آب وارد می‌شود، تشکیل شده است. سپس هوا از طریق کف متخلخل یا از طریق پاشنه‌های نزدیک کف تزریق می‌شود [۱].

روش پرکاربرد دیگر در هوادهی آب و فاضلاب، استفاده از پخش‌کننده‌های هوا<sup>۱</sup> است. پخش‌کننده‌های هوا به دو صورت ریز حباب و حباب درشت هستند. پخش‌کننده‌های ریز حباب، حباب‌هایی به قطر ۲ تا ۲/۵ میلی‌متر و پخش‌کننده‌های درشت حباب، حباب‌هایی تا قطر ۲۵ میلی‌متر را تولید می‌کنند. پخش‌کننده‌های ریز حباب به دلیل ایجاد مساحت سطح بیشتر در واحد حجم هوا، دارای بازدهی بالاتری در انتقال اکسیژن هستند [۱].

روشی نوین که امروزه در هوادهی و گندزدایی آب و فاضلاب مورد توجه قرار گرفته است، استفاده از مولدهای میکرو-نانو حباب است که دارای بازدهی بالاتری نسبت به روش‌های اشاره شده، دارد و در ادامه به آن پرداخته شده است.

## ۲-۳ روش‌های گندزدایی آب و فاضلاب

در فرآیند تصفیه‌ی آب و فاضلاب، گندزدایی به منظور نابودی ریزموجودات زنده بیماری‌زا یا برای بی‌ضرر ساختن آن‌ها انجام می‌شود. از ریزموجودات زنده در آب یا فاضلاب می‌توان به عنوان مثال به انواع باکتری‌ها، جلبک‌ها، قارچ‌ها، پروتوزوئرها و ویروس‌ها اشاره کرد. گندزدای خوب باید در غلظت‌های کمتر از حد سمی برای انسان‌ها و جانوران باشد. همچنین گندزدایی باید دارای سرعت عملکرد بالا بوده و برای جلوگیری از رشد مجدد باکتری‌ها و انتشارشان در سیستم، دارای ماندگاری

---

<sup>۱</sup>Diffuser

کافی باشد. عواملی مانند کدورت و مقاومت بعضی از ریزموجودات زنده، می‌تواند بر شدت گندزدایی اثری منفی داشته باشد. کلوئیدهای به وجود آورنده‌ی کدورت به دلیل ایجاد سپر محافظتی در اطراف ریزموجودات و جلوگیری از عملکرد لازم مواد گندزدا، بقای ریزموجودات را تداوم می‌بخشند. همچنین ذرات جامد ممکن است مواد گندزدا را جذب نمایند. ویروس‌ها، کیست‌ها و تخمک‌ها در مقایسه با باکتری‌ها، در برابر مواد گندزدا مقاومت بیشتری از خود نشان می‌دهند و برای از بین بردن این قبیل موجودات باید در صورت لزوم، زمان تماس و غلظت مواد گندزدا را افزایش داد [۱].

برای انجام فرآیند گندزدایی می‌توان از مواد شیمیایی نظیر گروه هالوژن، ازن، نقره یا پرتودهی با امواج گاما یا اشعه‌ی فرابنفش، صوت، الکتریسیته، گرمادهی، روش‌های فیزیکی استفاده کرد یا از روش‌های نوین امروزی مانند فناوری میکرو-نانو حباب بهره جست. از جمله پرکاربردترین روش‌های گندزدایی، می‌توان به کلرزی و ازن‌زی اشاره کرد.

در روش کلرزی، کلر ممکن است به شکل گاز و یا یونیزه شدن حاصل از جامدات (NaOCl)،  $Ca(OCl)_2$  در آب، مورد استفاده قرار گیرد. در واکنش کلر در آب، عواملی نظیر شکل کلر، pH، غلظت، زمان تماس، نوع ریز موجودات و دما مؤثر هستند. در این فرآیند، اسید هیپوکلرو (HOCl) و یون هیپوکلریت ( $OCl^-$ ) آزاد می‌شوند که به مجموع HOCl و OCl<sup>-</sup> کلر آزاد باقی‌مانده گفته می‌شود و این کلر عامل گندزدای اصلی به شمار می‌رود. در غلظت‌های پایین، کلر در اثر نفوذ درون سلولی و انجام واکنش با آنزیم‌ها و پروتوپلاسم منجر به نابودی ریزموجودات و در غلظت‌های بالاتر، اکسیداسیون دیواره‌ی سلول سبب مرگ ریزموجودات می‌گردد. محصولات به وجود آمده از اکسیداسیون مواد آلی توسط کلر، سبب تشکیل ترکیبات هیدروکربنی کلردار و سرطان‌زا می‌شود و به همین دلیل لازم است که پیش از کلرزی، مواد آلی موجود در آب جدا شوند [۱]. همچنین کلر باعث ایجاد استرس فیزیولوژیکی و آسیب‌غشایی به سلول‌ها می‌شود و به ترتیب آزاد شدن مواد آلی خارج و درون سلولی را به همراه دارد که ممکن است باعث ایجاد طعم و بو در آب شود [۲]. از گذشته

گندزدهای بر پایه کلر، به طور گسترده برای گندزدایی آب آشامیدنی در برابر بیشتر باکتری‌ها، قارچ‌ها و ویروس‌ها مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۳]؛ اما ظهور باکتری‌های مقاوم به کلر، موجب تهدید سلامت جامعه شده است [۴]. با توجه به خطر احتمالی باکتری‌های مقاوم در برابر کلر، تحقیقات در مورد فرآیندهای گندزدایی جایگزین، به خصوص استفاده از ازن، به یک موضوع عمومی تبدیل شده است [۵].

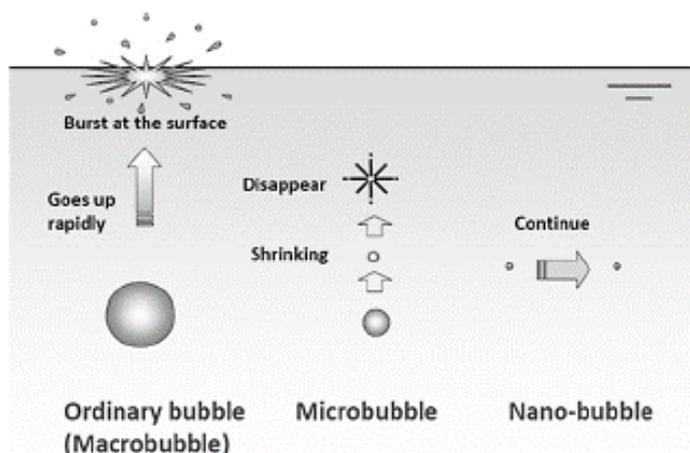
روش پرکاربرد دیگر، استفاده از ازن به عنوان گندزدا است. ازن آلوتروپ اکسیژن است و در میدان‌های الکتریکی بسیار قوی از اکسیژن خالص و یا یونیزاسیون هوای خشک و تمیز به دست می‌آید. ازن اکسید کننده‌ای قوی است که با ترکیبات معدنی احیاء می‌شود و با مواد آلی واکنش می‌دهد. تفاوت ازن با کلر به این دلیل است که یک اتم اکسیژن به جای یک اتم کلر به مواد آلی اضافه می‌شود و محصول نهایی یک ماده‌ی بی‌زیان برای محیط‌زیست است. ازن به شدت با باکتری‌ها و ویروس‌ها واکنش می‌دهد و در برابر نابودی ریزموجودات مقاوم، تأثیر بیشتری نسبت به کلر دارد. به جهت ناپایداری شیمیایی ازن، این ماده باید در محل تولید و به سرعت مصرف شود. مقادیر مصرفی ازن از ۱ تا ۵ کیلوگرم بر ۱۰۰۰ متر مکعب با مصرف توان بین ۱۰ تا ۲۰ کیلووات ساعت بر کیلوگرم ازن متغیر است. هزینه‌ی استفاده از ازن ۲ تا ۳ برابر بیشتر از هزینه‌ی کلرزی است. همچنین به دلیل ناپایداری ازن، استفاده از اندکی کلر پس از ازن‌زنی برای تداوم محافظت در برابر رشد مجدد ریزموجودات در سیستم توزیع آب ضروری است [۱]. ازن‌زنی با واکنش مستقیم مولکولی ازن و واکنش غیر مستقیم رادیکال OH می‌تواند به غشای سلول و دیواره حمله کند، یکپارچگی غشاء را مختل کند و مواد سلولی را از سلول آزاد کرده و شکاف ایجاد کند و نیز سلول‌های آسیب دیده را به قطعات زیادی تقسیم کند [۶].

عوامل زیادی از جمله حلالیت و پایداری نسبتاً کم در آب و هزینه بالای تولید، مانع استفاده از ازن می‌شوند [۷] و برای حل این مشکل باید با روش‌های نوین از ازن برای گندزدایی آب و فاضلاب

استفاده کرد. به عنوان مثال، می‌توان اثربخشی ازن‌زنی را با افزایش مساحت سطح ازن از طریق تولید حباب‌های کوچکتر افزایش داد [۷].

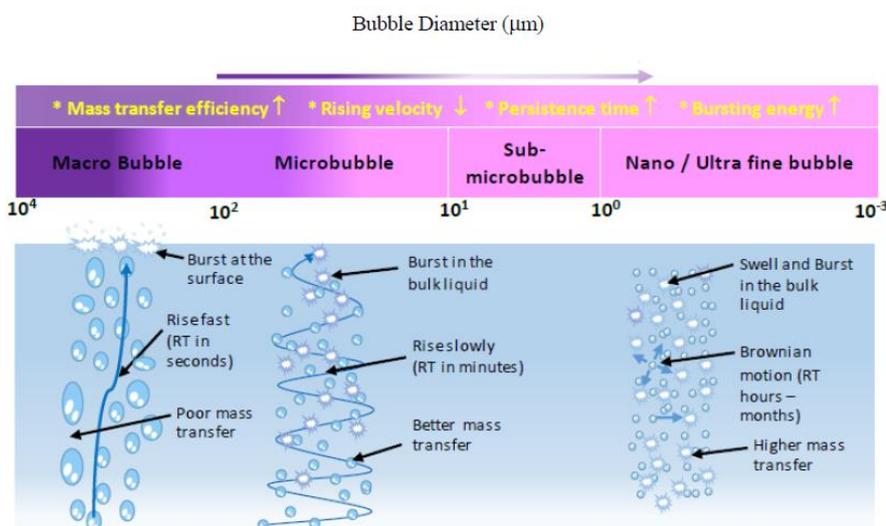
## ۲-۴ میکرو-نانو حباب‌ها

امروزه از فناوری میکرو-نانو حباب (میناب) برای محبوس ساختن گازهایی نظیر هوا، اکسیژن، ازن و گازکربنیک در مایع استفاده می‌شود. به طور کلی، میکرو-نانو حباب‌ها بر اساس اندازه‌ی حباب‌ها طبقه‌بندی می‌شوند. میکرو حباب‌ها دارای اندازه‌ی ۱۰ تا ۵۰ میکرومتر و اندازه‌ی نانو حباب‌ها کمتر از ۲۰۰ نانومتر است [۸]. قابل توجه‌ترین ویژگی میکرو-نانو حباب‌ها، توانایی کاهش اندازه و تخریب در زیر آب است. در حالی که حباب‌های معمولی در آب، به سرعت به سطح آمده و از بین می‌روند. علاوه بر این، با کوچک شدن حباب‌ها، فشار داخلی حباب به دلیل کشش سطحی، افزایش می‌یابد [۹]. همان‌طور که در شکل ۱-۲ نشان داده شده است، حباب معمولی (ماکرو حباب) به سرعت به سمت بالا حرکت می‌کند و پس از رسیدن به سطح متلاشی می‌شود. میکرو حباب‌ها به دلیل ایستایی طولانی و انحلال گازهای داخلی در محیط آبی، تمایل دارند تا به تدریج اندازه خود را کاهش دهند و سپس ناپدید شوند. نانو حباب‌ها نیز می‌توانند برای ماه‌ها در آب باقی بمانند و به یک‌باره متلاشی نمی‌شوند [۸].



شکل ۱-۲: شماتیک بالا آمدن حباب معمولی، میکرو حباب و نانو حباب به سطح آب [۸]

میکرو-نانو حباب‌ها با توجه به اندازه قطر کمتر در مقایسه با حباب‌های معمولی، فشارهای داخلی زیاد و سرعت انتقال جرم بالاتری را دارند و می‌توانند حلالیت گاز را به طور قابل توجهی بهبود ببخشند. یکی دیگر از ویژگی‌های قابل توجه میکرو-نانو حباب‌ها، سطح ویژه زیاد آنها است که منجر به افزایش ظرفیت جذب آلاینده‌ها در سطح حباب می‌شود [۱۰]. در شکل ۲-۲ خلاصه‌ای از محدوده اندازه ذرات حباب‌ها و ویژگی‌های اصلی حباب‌ها نشان داده شده است. در سال‌های اخیر کاربرد قابل توجه میناب‌ها در مهندسی محیط‌زیست به کانون تحقیق تبدیل شده است و در تمامی صنایع به خصوص صنعت آب و فاضلاب با توجه به کاهش هزینه‌ها و افزایش بازدهی مورد توجه قرار گرفته است.



شکل ۲-۲: محدوده اندازه ذرات حباب‌ها و ویژگی‌های حباب‌ها [۱۱]

## ۲-۴-۱ ویژگی میکرو-نانو حباب‌ها

برای مقایسه میکرو-نانو حباب‌ها با حباب‌های معمولی (میلی‌متر یا سانتی‌متر)، می‌توان مهم‌ترین ویژگی‌های آنها را به شرح زیر برشمرد:

### الف) سرعت بالا آمدن آهسته

سرعت بالا آمدن میکرو حباب‌ها و نانو حباب‌ها نسبت به حباب‌های معمولی، بسیار آهسته است

[۹]. ترنر<sup>۱</sup> ابتدا تأکید کرد که میکرو حباب‌ها با شعاع ۳۰ میکرومتر، می‌توانند در آب پایدار شده و برای مدت طولانی ماندگار باشند [۱۲]. اوهگاکي<sup>۲</sup> و همکاران دریافتند که نانو حباب‌های نیتروژن، متان یا آرگون، با شعاع ۵۰ نانومتر ماندگاری بیش از دو هفته را دارند [۱۳]. با توجه به نتایج تجربی، سرعت بالا آمدن میناب‌های کروی شکل، با استفاده از معادله استوکس (رابطه (۱-۲)) قابل محاسبه است [۹].

$$U = \frac{\rho g d^2}{18\mu} \quad (1-2)$$

که در آن  $U$  سرعت بالا آمدن،  $\rho$  چگالی مایع،  $g$  شتاب گرانش،  $d$  قطر حباب و  $\mu$  ویسکوزیته مایع است.

#### ب) فشار داخلی زیاد و انحلال زیاد گاز

فشار داخلی حباب‌ها با استفاده از معادله یانگ-لاپلاس که در رابطه (۲-۲) آمده است، محاسبه می‌شود که در آن  $\Delta P$  فشار داخلی حباب،  $\sigma$  کشش سطحی و  $d$  قطر حباب است و با کاهش قطر حباب، فشار داخلی حباب افزایش می‌یابد [۹]. طبق قانون هنری<sup>۳</sup>، با افزایش فشار داخلی گاز، مقدار گاز محلول در اطراف حباب، افزایش می‌یابد. در نهایت، گاز موجود در میکرو-نانو حباب‌ها می‌تواند در آب حل شود و حلالیت گاز در آب را به حالت فوق اشباع برساند [۱۴].

$$\Delta P = \frac{4\sigma}{d} \quad (2-2)$$

#### پ) سطح ویژه بالا

میکرو-نانو حباب‌ها از سطح ویژه بالایی برخوردار هستند. منظور از سطح ویژه، نسبت مساحت سطح حباب‌ها به حجم است که با فرض کروی بودن حباب‌ها، با توجه به رابطه (۳-۲) محاسبه

---

<sup>۱</sup>Turner

<sup>۲</sup>Ohgaki

<sup>۳</sup>Henry

می‌شود که در آن  $A$  مساحت سطح حباب،  $V$  حجم،  $r$  شعاع حباب و  $d$  قطر حباب است [۹].

$$\frac{A}{V} = \frac{4\pi r^2}{\frac{4}{3}\pi r^3} = \frac{3}{r} = \frac{6}{d} \quad (۳-۲)$$

### ت) انتقال جرم بالا

در میکرو-نانو حباب‌ها، نرخ انتقال جرم حباب گاز به مایع اطراف، با کاهش قطر حباب و افزایش فشار داخلی حباب، افزایش می‌یابد [۱۵]. به عنوان مثال، تأیید شده است که میکرو-نانو حباب‌ها، به طور قابل توجهی بازده انتقال جرم از [۱۰] و اکسیژن [۱۵] را افزایش می‌دهند.

### ث) بار سطحی منفی و پتانسیل زتا بالا

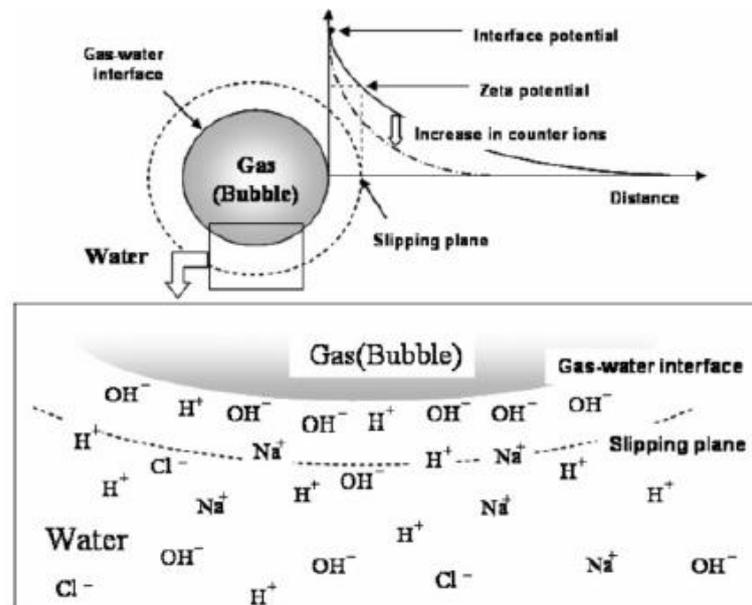
تاکاهاشی<sup>۱</sup> [۱۶] با استفاده از مجموعه آزمایش سلول‌های الکتروفورز<sup>۲</sup> پتانسیل‌های سطح میکرو حباب را اندازه‌گیری کرد. میکرو حباب‌های تشکیل شده به وسیله مولد در مخزن آب، به سلول الکتروفورز وارد شدند. او از سوئیچ انتقال برای تغییر جهت پتانسیل الکتریکی در سلول الکتروفورز، هر یک ثانیه استفاده کرد. طبق نتیجه به دست آمده، میکرو حباب‌ها دارای بار سطحی منفی هستند. یون‌های باردار اطراف سطح میکرو-نانو حباب‌ها می‌توانند یک لایه دوتایی الکتریکی ایجاد کنند که در شکل ۳-۲ نشان داده شده است. پتانسیل سطح مشترک میکرو-نانو حباب‌ها که عامل مهمی برای تعیین عملکرد جذب سطح مشترک حباب است، نشان‌دهنده اختلاف پتانسیل بین لایه دوتایی الکتریکی در سطح حباب‌ها است. زمانی که میکرو-نانو حباب‌ها در آب کوچک می‌شوند، یون‌های باردار به سرعت در سطح حباب متراکم می‌شوند و افزایش قابل توجهی را در پتانسیل زتا نشان می‌دهد و مقدار پتانسیل بسیار بالایی قبل از ترکیدن حباب‌ها در سطح تولید می‌شود [۱۷]. پژوهشگران

---

<sup>۱</sup>Takahashi

<sup>۲</sup>Electrophoresis

دریافتند که مقادیر پتانسیل زتا در محدوده وسیعی از شرایط pH، منفی است و مقادیر مطلق در محدوده ۳۴ تا ۴۵ میلی‌ولت برای اکسیژن، ۱۷ تا ۲۰ میلی‌ولت برای هوا، ۲۹ تا ۳۵ میلی‌ولت برای نیتروژن، ۲۰ تا ۲۷ میلی‌ولت برای دی‌اکسید کربن و ۱۱ تا ۲۲ میلی‌ولت برای زنون است [۱۸]، اما میکرو-نانو حباب‌ها تحت شرایط کاملاً اسیدی، بار مثبت دارند [۱۶].



شکل ۲-۳: توزیع یون‌ها در نزدیکی سطح گاز-آب در محلول آبی NaCl و تشکیل لایه دو تایی الکتریکی [۱۶]

### ج) تولید رادیکال‌های آزاد

در اثر انحلال و متلاشی شدن میکرو-نانو حباب‌ها، ناپدید شدن سطح گاز-مایع، منجر به تغییرات شدیدی می‌شود و می‌تواند انرژی جمع شده توسط غلظت بالای یون‌های مثبت و منفی سطح را آزاد کند تا توده‌ای از رادیکال‌های هیدروکسیل تولید شود [۱۷]. با این حال، تعداد رادیکال‌های آزاد تولید شده نیز تا حدودی تحت تأثیر نوع گاز موجود در میکرو-نانو حباب‌ها قرار دارند [۱۹، ۲۰].

## ۲-۴-۲ روش‌های تولید میکرو-نانو حباب‌ها

برای تولید میکرو-نانو حباب‌ها از روش‌های مختلفی استفاده می‌شود که در ادامه به برخی از روش‌های تولید اشاره شده است.

## الف) روش انتشار گاز محلول تحت فشار

قاعده اصلی روش انتشار گاز محلول تحت فشار، تغییر فشار گاز است [۲۱]. در شرایط تحت فشار، هوا در آب حل می‌شود و حالت فوق اشباع هوا را ایجاد می‌کند، سپس هوا ناگهان از حالت فشرده خارج می‌شود و به صورت حباب‌های ریز در آب آزاد می‌شود. علاوه بر این، روش تحت فشار می‌تواند میکرو-نانو حباب‌ها (میناب) را با انجام یک عملیات پمپاژ کوتاه مدت روی محلول آبی انجام دهد. با این حال، کمبودهایی در عدم پیوستگی فرآیندهای انحلال و انتشار گاز و نیز بازدهی پایین تولید میناب وجود دارد. برای رفع این نقص‌ها، روشی برای تولید میناب‌ها توسط پمپ شناور هوا ایجاد شد که ترکیبی از فناوری انتشار گاز پیش‌برنده و روش انتشار گاز محلول تحت فشار است و در مقایسه با روش قبلی، میزان تولید میناب بالاتر و اندازه حباب کوچکتر است [۲۲].

## ب) روش پراکنده کردن هوا

قاعده اصلی روش پراکنده کردن هوا، استفاده از روش‌های مختلف مانند برش هیدرولیکی، چرخش با سرعت بالا، جریان جت، ساختار ریز متخلخل برای تشکیل نیروهای برشی و ایجاد شرایط شدید است که تحت آن هوا مرتباً بریده شده و شکسته می‌شود تا با آب مخلوط شود و مقدار زیادی میناب ایجاد کند [۲۲]. در پژوهشی، الیویرا<sup>۱</sup> و همکاران [۲۳] پارامترهای پراکندگی نانو حباب‌های هوا تولید شده در یک لوله کاویتاسیون هیدرودینامیکی با نرخ بالا را بررسی کردند و دریافتند، زمانیکه نرخ حجم گاز-مایع، ۳۰ درصد باشد، نانو حباب‌ها دارای قطر متوسط ۲۲۰ تا ۲۸۰ نانومتر و غلظت  $10^8 \times$  ۶/۴ نانومتر در میلی‌لیتر هستند.

## پ) روش الکتروشیمیایی

روش الکتروشیمیایی نمی‌تواند تنها به طور مستقیم توده‌ای از میناب‌ها را در یک محلول آبی تولید کند، بلکه از یک زیرلایه رسانا به عنوان الکترود برای تولید میناب‌های رابط در سطح آن نیز استفاده

---

<sup>۱</sup>Oliveira

می‌کند. تعداد و اندازه میناب‌های سطحی تولید شده به کمک الکترولیز را می‌توان با اندازه ولتاژ اعمال شده و زمان الکترولیز کنترل کرد [۲۲]. در پژوهشی، یانگ<sup>۱</sup> و همکاران [۲۴] برای تولید میناب، آب را در سطح گرافیت پیرولیتیک<sup>۲</sup> بسیار جهت‌دار (HOPG) الکترولیز کردند. آن‌ها دریافتند، هنگامی که سطح HOPG به عنوان یک الکتروود منفی (مثبت) عمل می‌کند، میناب‌های هیدروژن (اکسیژن) تولید می‌شوند. علاوه بر این، تعداد میناب‌های هیدروژن تقریباً دو برابر میناب‌های اکسیژن بود.

### ت) روش کاویتاسیون اولتراسونیک<sup>۳</sup>

کاویتاسیون اولتراسونیک فرآیندی است که در آن هسته‌های با انرژی زیاد تولید شده توسط انرژی اولتراسونیک، به طور یکنواخت در محلول یا ناهمگن، روی سطح آبگریز رشد می‌کنند و به طور مداوم انرژی صوتی را جمع می‌کنند. وقتی انرژی به آستانه خاصی می‌رسد، حباب‌های کاویتاسیون به سرعت منقبض شده و پاره می‌شوند. قطر مؤثر حباب‌های تولیدی، به قدرت اولتراسونیک و زمان صوت ارتباط دارد [۲۲]. در پژوهشی، چو و همکاران<sup>۴</sup> [۲۵] از دستگاه صوتی Vibra-Cell برای صوتی‌سازی محلول تولید میناب‌ها با قطر موثر ۷۵۰ تا ۸۰۰ نانومتر استفاده کردند. بازدهی تولید میناب توسط کاویتاسیون اولتراسونیک زیاد نیست و اندازه حباب‌ها به دلیل تبخیر اجزای فرار با ادامه‌ی استفاده از اولتراسونیک، به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد که باید بیشتر بهبود پیدا کند.

### ث) روش جایگزینی محلول

روش جایگزینی محلول، به یک بستر و دو محلول با حلالیت گازی متفاوت که می‌توانند به طور متقابل حل شوند، نیاز دارد. هنگامی که یک محلول با حلالیت گازی زیاد با محلول با حلالیت گازی کم جایگزین می‌شود، گاز اضافی روی سطح بستر رسوب می‌کند و میناب‌ها ایجاد می‌شوند [۲۲].

---

<sup>۱</sup>Yang

<sup>۲</sup>Pyrolytic

<sup>۳</sup>Ultrasonic

<sup>۴</sup>Cho et al.

کیو و همکاران<sup>۱</sup> [۲۶] از روش جایگزینی محلول تبادل اتانول و آب استفاده کردند. آن‌ها از این روش، در شرایط بهینه نسبت اتانول به آب با نسبت ۱ به ۱۲ و دمای آزمایش ۳۵ درجه سانتی‌گراد، برای تولید میناب‌هایی با محدوده اندازه قطر ۱۰۰ تا ۲۰۰ نانومتر و غلظت  $10^8 \times 4$  در هر میلی‌لیتر استفاده کردند که برای بیش از ۴/۵ ساعت پایدار بودند.

علاوه بر این، از روش‌های دیگری نیز مانند جریان مارپیچی، لوله ونتوری، درجه حرارت بالا، واکنش‌های شیمیایی و میکرو لوله‌ها برای تولید میکرو-نانو حباب‌ها استفاده می‌شود. کاویتاسیون هیدرودینامیکی متداول‌ترین سیستم در فناوری‌های تصفیه آب است و می‌توان آن را با اشباع تحت فشار، برش حباب، شکاف و همزنی مکانیکی بدست آورد.

## ۲-۴-۳ کاربرد فناوری میکرو-نانو حباب

مولدهای میکرو-نانو حباب می‌توانند با استفاده از گازهای متفاوت برای هدف‌های گوناگونی مورد استفاده قرار گیرند. میناب هوا متداول‌ترین نوع میناب است که کاربردهای زیادی در پزشکی، بهداشت فردی، تصفیه‌ی آب و فاضلاب و سایر علوم دارد. از میناب اکسیژن در زمینه‌ی پرورش آبزیان، درمان سلول‌های سرطانی، کاهش بار میکروبی فاضلاب و... استفاده می‌شود. نوع دیگر میناب که بسیار کاربردی است، میناب ازن با خاصیت اکسیدکنندگی بالا است. میناب ازن در شرایط یکسان فشار و دما، دارای ماندگاری بالاتری نسبت به سایر روش‌های تزریق ازن است و به دلیل بازدهی بسیار مناسب و خاصیت گندزدایی بالا می‌تواند مورد توجه تصفیه‌خانه‌های فاضلاب پتروشیمی قرار گیرد.

در سال‌های اخیر، استفاده از میکرو-نانو حباب‌ها بیش‌تر در تصفیه و گندزدایی آب و فاضلاب، زمینه‌های پزشکی و داروسازی مورد توجه قرار گرفته است. استفاده از میکرو-نانو حباب‌های هوا برای فرآیند پیش‌تصفیه، نشان داده است که می‌تواند برای کوچک‌سازی تصفیه‌خانه‌های آب و فاضلاب و

---

<sup>۱</sup>Qiu et al.

همچنین بهبود کیفیت آب بسیار مفید باشد [۲۷، ۲۸]. در تصفیه آب از میناب ازن برای اکسیداسیون و گندزدایی استفاده شده است [۲۹]. در کاربردهای پزشکی، از میکروحبابها برای اسکن اعضای بدن و همچنین به عنوان دارو یا حامل ژن استفاده شده است [۳۰-۳۲]. در زمینه‌ی پاک‌سازی به دلیل خصوصیات حباب‌ها و توزیع اندازه حباب‌ها، به خصوص در تمیز کردن تجهیزات الکترونیکی مورد توجه قرار گرفته‌اند [۹]. میکرو-نانو حباب‌ها همچنین در نظافت [۳۳]، شست و شوی خاک [۳۴]، حذف نفت از خاک و آب [۳۵، ۳۶]، پرورش ماهی [۳۷] و صنعت غذایی [۳۸]، نیز کاربرد دارند. در ادامه به برخی از پژوهش‌های صورت گرفته در زمینه‌ی کاربرد فناوری میکرو-نانو حباب، اشاره خواهد شد.

لی و تسوگه<sup>۱</sup> [۳۹] به بررسی تصفیه آب با شناورسازی هوا تحریکی به وسیله میکرو حباب‌ها پرداختند. آن‌ها برای تصفیه آب از شناورسازی هوا تحریکی (IAF) با استفاده از یک مولد میکرو حباب جریان دوار بهره بردند و اندازه میکرو حباب، غلظت میکرو حباب و بازدهی حذف ذرات توسط مولد میکرو حباب با روش‌های معمول را مقایسه کردند. نتایج به دست آمده نشان داد که استفاده از مولد میکرو حباب عملکرد بهتری دارد. با کاهش اندازه میکرو حباب، غلظت میکرو حباب با استفاده از این روش بهبود نیز یافت. علاوه بر این مشخص شد که بازدهی حذف ذرات بیش از ۹۵ درصد بوده و زمان لخته‌سازی به خوبی کاهش پیدا می‌کند.

لی و همکاران<sup>۲</sup> [۴۰] در پژوهش خود، به بررسی حذف فنل<sup>۳</sup> که یکی از متداول‌ترین آلاینده‌ها در فاضلاب صنعتی است، با استفاده از میکرو حباب‌های هوا پرداخته‌اند. در این پژوهش از محلول فنل با pH در محدوده ۲ تا ۱۱، مولد میکرو حباب با نرخ جریان آب ۸/۷ لیتر بر دقیقه و نرخ جریان گاز ۰/۵

---

<sup>۱</sup>Li and Tsuge

<sup>۲</sup>Li et al.

<sup>۳</sup>Phenol

لیتر بر دقیقه استفاده شده است. آن‌ها توانستند با استفاده از میکرو حباب هوا در مدت زمان ۲ ساعت، ۶۰ درصد از فنل را کاهش دهند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که با کاهش pH محلول از ۴ به ۲، میزان کاهش فنل بسیار افزایش می‌یابد. سینتیک فرآیند حذف فنل از نوع شبه مرتبه اول بوده و ثابت سینتیک (k) به صورت خطی با افزایش غلظت  $H^+$  افزایش می‌یابد. آن‌ها همچنین نتیجه گرفتند که استفاده از میکرو حباب اکسیژن با مقدار k معادل  $1/6h^{-1}$  باعث بالاترین میزان کاهش می‌شود. آن‌ها دریافتند که احتمالاً، رادیکال‌های هیدروکسیل، نقش مهمی را در حذف فنل بازی می‌کنند.

لیو و همکاران<sup>۱</sup> [۴۱] در پژوهشی به بررسی تأثیر میکرو حباب‌ها بر روند شناورسازی انعقادی پساب رنگرزی پرداختند. آن‌ها به منظور افزایش اثر پیش‌تصفیه پساب رنگرزی، آزمایش‌های مقایسه‌ای شناورسازی انعقادی با میکرو حباب و شناورسازی انعقادی با حباب هوای معمولی را انجام دادند. نتایج نشان داد که شناورسازی انعقادی میکرو حباب، به طور قابل توجهی دوزهای انعقادی را کاهش و میزان پیش‌تصفیه را افزایش می‌دهد. زیرا استفاده از مولد میکرو حباب باعث تولید میکرو حباب‌هایی با قطر ده‌ها میکرومتر می‌شود که ماندگاری بالاتری در آب دارد. علاوه بر این، میکرو حباب‌ها می‌توانند به سرعت انتقال اکسیژن بالاتری برسند. در این پژوهش، ضریب انتقال جرم کل میکرو حباب‌ها  $1/1754$  بر معکوس دقیقه و حباب‌های هوای معمولی  $0/7535$  بر معکوس دقیقه بود. تحت همان شرایط، بازدهی حذف اکسیژن مورد نیاز شیمیایی (COD)، رنگ و روغن برای شناورسازی با میکرو حباب به ترتیب ۳۰، ۱۱۰ و ۴۰ درصد، نسبت به شناورسازی با حباب معمولی، افزایش یافته است. علاوه بر این، تجزیه بیولوژیکی پساب پس از شناورسازی انعقادی میکرو حباب، از  $0/290$  به  $0/363$  و پس از شناورسازی انعقادی با حباب معمولی به  $0/301$  افزایش یافت. در این پژوهش نشان دادند که استفاده از فناوری میکرو حباب در فرآیندهای انعقادی ممکن است یک روش

---

Liu et al.

کارآمد و مقرون به صرفه برای تصفیه فاضلاب را فراهم کند.

لی و همکاران<sup>۱</sup> [۴۲] به بررسی اثر شوری آب زیرزمینی بر بهبود پاکسازی زیستی با استفاده از میکرو-نانو حبابها پرداختند. در این مطالعه، توزیع اندازه ذرات، بازده انتقال اکسیژن، پتانسیل زتا میکرو-نانو حبابها و نفوذپذیری آب دارای میکرو-نانو حباب از طریق ماسه در غلظت‌های مختلف از نمک مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که شوری آب هیچگونه تأثیری بر توزیع اندازه ذرات در طول فرآیند تولید میکرو-نانو حباب ندارد. میکرو-نانو حبابها می‌توانند تا حد زیادی راندمان انتقال اکسیژن را افزایش دهند و میکرو-نانو حبابها در آب شور با غلظت ۰/۷ گرم بر لیتر، کم‌ترین پتانسیل زتا را دارند. همچنین نتیجه شد که شوری آب بر نفوذپذیری ماسه توسط میکرو-نانو حبابها تأثیری نداشته است.

سان و همکاران<sup>۲</sup> [۴۳] به بررسی فناوری میکرو-نانو حباب و بستر رزین شناور در دو رودخانه آلوده در جنوب چین پرداختند. میکرو-نانو حبابها در هنگام پاکسازی رودخانه نقش مهمی دارند و برقراری شیوه تعامل بین میکروارگانیسمها و فاضلاب، از اهمیت به‌سزایی در بهبود فناوری پاکسازی برخوردار است. در این مطالعه ابتدا از فناوری کامپوزیت بستر رزین شناور و میکرو-نانو حباب اکسیژن (MBSR) برای بازیابی دو رودخانه سیاه و متعفن شهری استفاده شد. پس از پاکسازی، شاخص‌های آلودگی آب مانند اکسیژن محلول (DO)، نیتروژن آمونیاک ( $\text{NH}_4^+\text{-N}$ )، فسفر کل (TP)، اکسیژن مورد نیاز شیمیایی (COD)، شفافیت آب و جمعیت میکروبی به خصوص تعداد کلی‌فرم<sup>۳</sup> به طور قابل توجهی بهبود یافت. در این پژوهش پس از پاکسازی با MBSR، برخی از ریزموجودات هوایی تحریک و ظاهر شدند.

---

<sup>۱</sup>Li et al.

<sup>۲</sup>Sun et al.

<sup>۳</sup>Coliform

## ۲-۵ بررسی گندزدایی آب و فاضلاب با استفاده از مواد گندزدا

در تصفیه‌ی آب و فاضلاب، گندزدایی یکی از مهم‌ترین فرآیندها است. در این فرآیند بار میکروبی و بیولوژیکی به شدت کاهش می‌یابد و از رشد و تکثیر ریزموجودات در فرآیندهای بعدی و نیز اختلال در سایر فرآیندها جلوگیری می‌کند. به عنوان مثال، وجود جلبک در منابع آبی، می‌تواند مشکلات مختلفی را برای تصفیه و گندزدایی آب آشامیدنی ایجاد کند. جلبک‌ها و متابولیت‌های آن، می‌توانند تأثیر قابل توجهی بر کیفیت آب مانند تولید طعم و بوی نامطبوع و سموم ناشی از سیانوباکتری‌ها داشته باشند. همچنین، شناسایی شده است که جلبک‌ها در روند تصفیه آب دخالت می‌کنند و باعث کاهش عمر فیلترها، افزایش تقاضا در مواد منعقد کننده و رشد مجدد میکروبی در سیستم‌های توزیع می‌شوند [۴۴، ۴۵]. در میان مواد گندزدا که در تصفیه‌ی آب و فاضلاب استفاده می‌شود، ازن بیشترین تأثیر و کارایی را دارد. در ادامه به بررسی پژوهش‌های صورت گرفته در مورد فرآیند گندزدایی با استفاده از مواد گندزدا پرداخته می‌شود.

پلامر و ازوالد<sup>۱</sup> [۴۶] در پژوهشی به بررسی اثرات کلر و ازن بر ویژگی‌های سلول جلبکی و حذف جلبک‌ها توسط فرآیند انعقاد پرداختند. در این آزمایش برای بررسی اثرات کلر و ازن، جلبک سبز (*Scenedesmus quadricauda*) و دیاتومه (*Cyclotella sp.*) انتخاب شدند. دوزهای مواد اکسید کننده، یک، سه و هشت میلی‌گرم بر لیتر انتخاب شد. ویژگی‌های سلول با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)، توزیع اندازه ذرات و اندازه‌گیری‌های تحرک الکتروفورتیک مشخص شد. آن‌ها برای ارزیابی انعقاد سوسپانسیون جلبک با پلی آلومینیوم کلراید (PAC) از آزمایش‌های جار<sup>۲</sup> استفاده کردند. نتایج انعقاد، همراه با نتایج حاصل از SEM ها و توزیع اندازه ذرات، نشان می‌دهد که اکسید کننده‌ها به دیواره سلول *Scenedesmus* حمله می‌کنند، باعث تغییراتی در سطح سلول و

---

<sup>1</sup>Plummer and Edzwald

<sup>2</sup>Jar Test

همچنین باعث اضمحلال برخی سلول‌ها می‌شوند. سلول‌های *Cyclotella* مقاومت بیشتری در برابر آسیب توسط اکسید کننده‌ها نشان دادند و تغییری در ویژگی‌های سلول حاصل نشد. علاوه بر این مشخص شد، پیش‌اکسیداسیون غلظت کربن آلی آب ته نشین شده را افزایش می‌دهد، که می‌تواند منجر به افزایش طعم و بو و تولید محصولات جانبی گندزدا شود.

ولاسکوئز و همکاران<sup>۱</sup> [۴۷] به بررسی گندزدایی فاضلاب با استفاده از ازن برای از بین بردن باکتری‌های بسیار بیماری‌زای آزاد و آمیب<sup>۲</sup> پرداختند. در این پژوهش از غلظت ازن ۵۱/۵ میلی‌گرم در لیتر برای مدت زمان‌های مختلف و در pH های پنج و هفت در دو نمونه‌ی سنتزی و طبیعی باکتری‌های *S. typhi* و *V. cholerae* و تک‌یاخته‌ی *Acanthamoeba* و همچنین برای شاخص‌های آلودگی بیولوژیکی نظیر باکتری‌های کلیفرم کلی (TC) و کلیفرم مدفوعی (FC) استفاده شد. نتایج آزمایش نشان داد که در ۱۴ دقیقه، تمام باکتری‌ها و آمیب به طور کامل از بین رفتند.

چن و همکاران<sup>۳</sup> [۴۸] به بررسی مقایسه ازن و پرمنگنات<sup>۴</sup> در حذف انعقادی جلبک پرداختند. آزمایش برای حذف جلبک در حضور منعقد کننده آلوم<sup>۵</sup> انجام شد. در این آزمایش، از ازن در محدوده غلظت یک تا هفت میلی‌گرم در لیتر، پرمنگنات در محدوده غلظت ۰/۵ تا ۱/۷۵ میلی‌گرم در لیتر و آلوم با غلظت ۷۰ میلی‌گرم در لیتر استفاده شده است. نتایج نشان داد که غلظت مناسب ازن و پرمنگنات توانایی بسیار بالایی در حذف جلبک دارد اما اگر از غلظت بالایی استفاده شود، منجر به اضمحلال سلول شده و ماده‌ی آلی منتشر می‌شود.

---

<sup>۱</sup>Velasquez et al.

<sup>۲</sup>Amoebae

<sup>۳</sup>Chen et al.

<sup>۴</sup>Permanganate

<sup>۵</sup>Alum

فن و همکاران<sup>۱</sup> [۴۹] در پژوهشی به بررسی عملکرد یک فرآیند یکپارچه ترکیبی ازن‌زنی با غشاء  
سرامیکی اولترافیلتراسیون به منظور تصفیه آب آشامیدنی پرداختند. برای انجام آزمایش از غشاءهای  
سرامیکی مسطح با متوسط قطر منافذ ۶۰ نانومتر و سطح فیلتراسیون ۵۰ متر مربع استفاده کردند.  
نتایج نشان داد که با غلظت ازن مصرفی دو تا پنج میلی‌گرم در لیتر با شار نفوذی ۱۰۰ لیتر بر متر  
مربع-ساعت، عملکرد فرآیند در حذف آلاینده‌ها و پارامترهای کیفی آب بسیار مناسب بوده و میزان  
بازدهی حذف آلاینده‌ها به میزان ۶۴ تا ۱۰۰ درصد است.

در پژوهشی لودک و همکاران<sup>۲</sup> [۵۰] به بررسی حذف باکتری‌های مقاوم به آنتی‌بیوتیک در  
تصفیه‌ی فاضلاب با ازن در ترکیب با روش‌های مختلف فیلتراسیون پرداختند. در این پژوهش برای از  
بین بردن باکتری‌ها، از ازن در ترکیب با زغال یا فیلتراسیون ماسه‌ای آهسته برای تصفیه فاضلاب  
جهت بهبود کیفیت فاضلاب تصفیه شده، استفاده کرده‌اند. برای تعیین میزان حذف باکتری‌های  
فاضلاب، ورودی و خروجی فاضلاب را برای شناسایی باکتری‌های *اشرشیاکلی*<sup>۳</sup>، *انتروکوکوی*<sup>۴</sup> و  
*استافیلوکوکوی*<sup>۵</sup> و مقاومت آن‌ها در برابر آنتی‌بیوتیک‌ها را در دوره‌ی ۱۷ ماهه مورد بررسی قرار دادند.  
آن‌ها با انجام آزمایش‌ها دریافته‌اند که ازن‌زنی به همراه عبور از فیلتر منجر به کاهش باکتری‌های کل و  
مقاوم به آنتی‌بیوتیک *اشرشیاکلی*، *انتروکوکوی* و *استافیلوکوکوی* به میزان ۰/۸ تا ۱/۱ واحد لگاریتمی  
می‌شود. همچنین تصفیه با ازن منجر به افزایش درصد مقاومت به آنتی‌بیوتیک‌های *اشرشیاکلی* (۱۶  
درصد) و *استافیلوکوکوی* (۵/۵ درصد) و کاهش سطح مقاومت *انتروکوکوی* (۲۵/۴ درصد) خواهد شد.

---

<sup>۱</sup>Fan et al.

<sup>۲</sup>Luddeke et al.

<sup>۳</sup>*Escherichia coli*

<sup>۴</sup>*Enterococci*

<sup>۵</sup>*Staphylococci*

دینگ و همکاران<sup>۱</sup> [۵] در پژوهشی به گندزدایی باکتری‌های مقاوم به کلر با استفاده از ازن در آب آشامیدنی پرداختند. در این مطالعه خصوصیات فیزیولوژیکی-بیوشیمیایی و پارامترهای کیفی (pH، دما و کدورت) هفت سویه از باکتری مقاوم در برابر کلر جدا شده از آب آشامیدنی، مورد بررسی قرار گرفتند. سویه‌های باکتریایی *Bacillus cereus*، *Bacillus alvei*، *Aeromonas jandaei*، *Pelomonas sp.* و *Vogesella perlucida*، *Lysinibacillus fusiformis*، *Aeromonas sobria* شناسایی شدند. از آزمایش‌ها نتیجه گرفته شد که در مدت زمان یک دقیقه و با غلظت ازن ۱/۵ میلی‌گرم بر لیتر، نرخ غیرفعال‌سازی سویه‌های باکتریایی بین دو تا چهار واحد لگاریتمی بوده است.

## ۲-۶ بررسی گندزدایی آب و فاضلاب با استفاده از فناوری میکرو-نانو حباب

در میان روش‌های گوناگون موجود در تصفیه و گندزدایی آب و فاضلاب، امروزه استفاده از فناوری‌های نوین به منظور افزایش اثربخشی فرآیند گندزدایی و نیز کاهش هزینه‌های اقتصادی، افزایش یافته است. در این میان، فناوری میکرو-نانو حباب (میناب) بیش از پیش برای تصفیه و گندزدایی آب و فاضلاب مورد توجه قرار گرفته است. در ادامه به پژوهش‌های صورت گرفته در زمینه‌ی استفاده از فناوری میناب در گندزدایی آب و فاضلاب پرداخته شده است.

سومیکورا و همکاران<sup>۲</sup> [۲۹] در پژوهشی به استفاده مجدد از فاضلاب با استفاده از میکرو حباب ازن به عنوان گندزدا پرداختند. در این آزمایش، فاضلاب با دبی ۱/۲ لیتر بر دقیقه به سیستم پمپاژ و از ازن با غلظت ۴۰ میلی‌گرم بر لیتر و مدت زمان تماس ۱۰ دقیقه برای ارزیابی ظرفیت غیرفعال‌سازی گروه کلی‌فرم استفاده شد. اکثر حباب‌ها اندازه‌ای بین ۳۰ تا ۶۰ میکرومتر داشتند. نرخ غیرفعال‌سازی

---

<sup>۱</sup>Ding et al.

<sup>۲</sup>Sumikura et al.

باکتری *E. coli* در سه حالت استفاده از اولتراسونیک، میکرو حباب هوا و نیز ترکیب اولتراسونیک و میکرو حباب هوا، مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که نرخ غیرفعال سازی باکتری *E. coli* در صورت استفاده از میکرو حباب هوا و ترکیب اولتراسونیک و میکرو حباب هوا، به ترتیب ۲۵ و ۴۴/۴ درصد بوده است.

تسوگه و همکاران<sup>۱</sup> [۵۱] در پژوهشی، اثر ضد میکروبی میکرو حباب های ازن بر باکتری *Bacillus subtilis* را بررسی کرده اند. طبق نتایج به دست آمده دریافتند که برای مدت زمان تماس ۳/۶ ثانیه و غلظت ازن محلول ۰/۵ میلی گرم بر لیتر، میزان بازدهی حذف باکتری ۹۹ درصد بوده است.

میچیوکو<sup>۲</sup> [۵۲] در پژوهشی به بررسی اکسیژن محلول در مخزن سد با مشکل یوتروفیکاسیون<sup>۳</sup>، با استفاده از هوادهی میکرو حباب ها پرداخت. بیشتر مخازن آب با زمان ماند طولانی، با مشکل اوتروفیکاسیون یا اشباع شدن از مواد معدنی و مغذی که منجر به کمبود اکسیژن و رشد جلبک می شود، مواجه هستند. در فصول گرم سال، مواد مغذی که وارد حوضه های آبی می شوند، در ناحیه ی نوری موجب جلب توجه جلبک ها هستند. با توجه به تابش خورشید، لایه های مخازن از نظر حرارتی طبقه بندی می شوند و از این جهت لایه ی زیرین مخازن بی هوازی شده و اکسیژن به ندرت از لایه ی هوازی به لایه ی زیرین می رسد. زمانی که لایه ی زیرین در معرض کمبود اکسیژن قرار می گیرد، مواد محلول نظیر فلزات یونی و ترکیبات آلی با هیدروژن سولفید آزاد می شوند و متان نیز از طریق رسوبات تولید می شود. از این جهت، آب آلوده می شود و نیاز به تصفیه آب به وسیله تزریق اکسیژن به لایه های زیرین ضرورت پیدا می کند. در این پژوهش، از مولد میناب با توانایی تولید میکرو حباب هایی با قطرهای در محدوده ی ۵۰ تا ۱۰۰ میکرون که دارای حلالیت اکسیژن بالا و عملکرد بهتر تصفیه ی آب

---

<sup>۱</sup>Tsuge et al.

<sup>۲</sup>Michioku

<sup>۳</sup>Eutrophication

است، استفاده شده است. نتایج به دست آمده از آزمایش‌ها نشان داد که عملکرد پیوسته‌ی سیستم هواده‌ی میکرو حباب، می‌تواند اکسیژن محلول را تأمین کند و مقدار اکسیژن محلول به حالت فوق اشباع برسد.

لیو و همکاران<sup>۱</sup> [۵۳] در پژوهشی به بررسی حالات مختلف میکرو حباب‌ها بر عملکرد فرآیند شناورسازی در پساب کک<sup>۲</sup> نفتی پرداختند. آزمایش‌ها برای مقایسه عملکرد میکرو حباب‌های هوا، اکسیژن و ازن انجام شد. نتایج نشان داد که میکرو حباب‌های ازن به دلیل پتانسیل زتای بالا، بهترین عملکرد را برای شناورسازی دارند. همچنین مشخص گردید که در مقایسه با هر دو روش شناورسازی میکرو حباب هوا و میکرو حباب اکسیژن، بازدهی حذف پیریدین<sup>۳</sup> از فرآیند شناورسازی میکرو حباب ازن، به ترتیب ۴/۵ و ۱/۷ برابر بیشتر و بازده حذف بنزن<sup>۴</sup> ۳/۶ و ۱/۵ برابر بیشتر بوده است.

ژانگ و همکاران<sup>۵</sup> [۵۴] در آزمایشی به بررسی تأثیر غلظت ازن بر عملکرد یک سیستم گندزدایی میکرو حباب ازن برای غیرفعال کردن باکتری *Bacillus subtilis* پرداختند. از ازن با غلظت‌های ۴۰، ۱۱۰ و ۱۴۰ میلی‌گرم بر لیتر استفاده شد. نتایج حاکی از آن بود که افزایش غلظت میکرو حباب‌های ازن باعث افزایش عملکرد سیستم گندزدایی شده است. به طوری‌که در مدت زمان سه دقیقه، با غلظت ورودی ازن ۴۰ میلی‌گرم بر لیتر، میزان باکتری ۰/۵ واحد لگاریتمی و با غلظت ورودی ازن ۱۴۰ میلی‌گرم بر لیتر، میزان باکتری ۵/۲ واحد لگاریتمی کاهش یافته است. همچنین مشخص شد غلظت گاز ورودی تأثیر به‌سزایی در تغییر قطر میکرو حباب‌ها دارد و زمانی‌که غلظت ازن ورودی افزایش می‌یابد، قطر میکرو حباب‌ها کاهش پیدا می‌کند.

---

<sup>۱</sup>Liu et al.

<sup>۲</sup>Coke

<sup>۳</sup>Pyridine

<sup>۴</sup>Benzene

<sup>۵</sup>Zhang et al.

بوی و همکاران<sup>۱</sup> [۵۵] در پژوهشی، به بررسی بازدهی حذف گونه‌های مختلف جلبک به وسیله میکرو حباب‌ها و شناورسازی هوای محلول (DAF) پرداختند. آن‌ها سه شکل از جلبک‌ها را که شامل کروی (*Microcystis sp.*)، بیضی (*Chlamydomonas angulosa*) و رشته‌ای (*Phormidium sp.*) بود، در شرایط آزمایشگاهی کشت دادند. برای انجام آزمایش‌ها از میکرو حباب‌های دارای بار مثبت با افزودن منعقد کننده آلومینیوم و با اندازه قطر حباب دو تا ۸۰ میکرومتر، استفاده کردند. نتایج نشان داد که در pH ۴/۵ تا ۷، تمام گونه‌های جلبک دارای بار منفی بوده و گونه بیضی‌شکل، بیش‌ترین مقدار بار منفی (۴۰- میلی‌ولت) را داشته است. همچنین نتیجه شد که از نظر تعداد سلول، بیش‌ترین بازدهی حذف (۸۶ درصد) مربوط به جلبک رشته‌ای بوده است.

در پژوهش دیگری، ژوانگ و همکاران<sup>۲</sup> [۵۶] به بررسی استفاده از حباب‌های ریز اکسیژن با راکتور زیستی غشایی به منظور حذف مواد آلی و جمعیت باکتریایی پساب زغال سنگ پرداختند. نتایج آزمایشگاهی نشان داد که استفاده از حباب‌های ریز اکسیژن در مقایسه با هوادهی با هوا، بازدهی حذف COD، ۲۸ درصد و کل فنل<sup>۳</sup>، ۳۶ درصد افزایش یافته است و همچنین جمعیت باکتریایی کاهش یافته است.

محسنی و همکاران [۵۷] با استفاده از تولید میکرو حباب‌هایی در محدوده‌ی ۳۷ میکرومتر تا ۲۲۵ میکرومتر، به بررسی عملکرد روی لجن فعال فاضلاب پرداختند. برای ارزیابی عملکرد میکرو حباب‌ها از منتشرکننده‌های غشایی استفاده کردند. نتایج آزمایش نشان داد که مولد میکرو حباب، توانایی انتشار ۲۲ درصد اکسیژن بیشتر نسبت به مولدهای معمولی را دارد و همچنین مصرف انرژی با استفاده از مولد میکرو حباب، به میزان ۵۱ درصد کاهش می‌یابد.

---

<sup>۱</sup>Bui

<sup>۲</sup>Zhuang et al.

<sup>۳</sup>Phenol

## ۲-۷ جمع‌بندی

در این فصل، مطالعات انجام شده در گذشته، شامل پژوهش‌هایی در زمینه هوادهی، روش‌های گندزدایی آب و فاضلاب، فناوری میکرو-نانو حباب و بررسی گندزدایی آب و فاضلاب با استفاده از مواد گندزدا و میکرو-نانو حباب به تفصیل مورد بررسی قرار گرفت. در فصل بعد، مواد مورد استفاده در آزمایش‌ها، پارامترهای مورد بررسی و روش اندازه‌گیری آن‌ها، ارائه شده است.

## فصل ۳ : مواد و روش ها

### ۳-۱ مقدمه

وجود ریزموجودات زنده از جمله جلبک‌ها و باکتری‌ها در آب پشت سدها، از مهم‌ترین و ابتدایی‌ترین مشکلات، جهت تأمین و تصفیه آب آشامیدنی است. بدین منظور لازم است تا آب خام ورودی به تصفیه‌خانه آب، جهت جلوگیری از اختلال در فرآیندهای تصفیه و نیز کاهش هزینه‌ها، ابتدا مورد گندزدایی قرار گرفته و منجر به کاهش ریزموجودات زنده در آب شود. در این فصل، شرح کاملی از فعالیت‌های میدانی و آزمایشگاهی انجام شده در این پژوهش ارائه شده است. در ادامه به معرفی مواد مورد استفاده در آزمایش‌ها، پارامترهای مورد بررسی و روش اندازه‌گیری آن‌ها و شرح آنالیزهای انجام شده بر روی نمونه‌ها پرداخته شده است. به منظور افزایش دقت و کاهش درصد خطا در انجام آزمایش‌ها، تمامی آزمایش‌ها حداقل با سه بار تکرار انجام شده است.

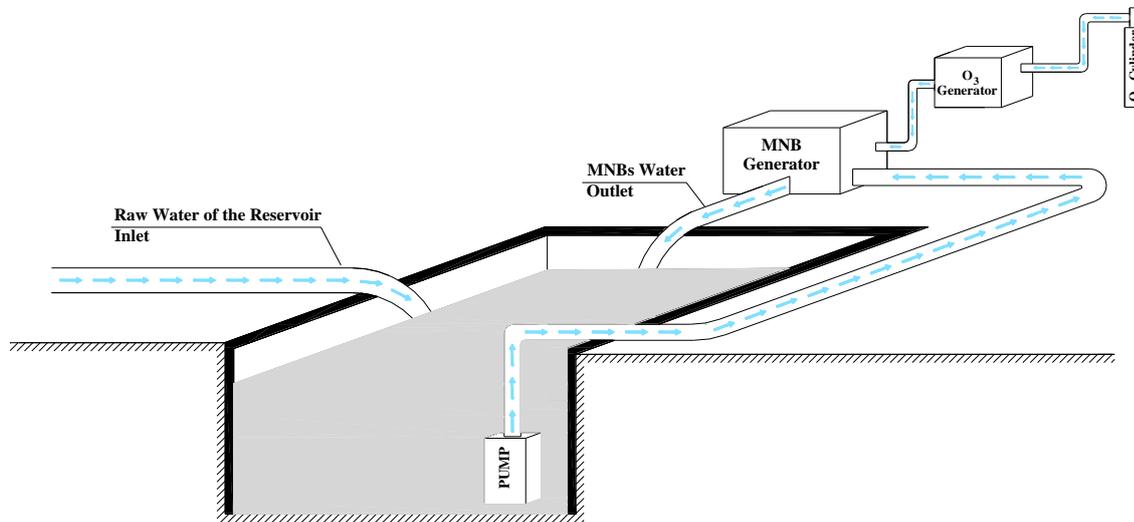
### ۳-۲ فعالیت‌های میدانی

به منظور گندزدایی آب خام ورودی به تصفیه‌خانه آب، نیاز به آماده‌سازی و نصب تجهیزاتی از جمله مولد میکرو-نانو حباب، دستگاه ازن‌ساز و پمپ کف‌کش در تصفیه‌خانه بود که در ادامه به آن اشاره شده است.

### ۳-۲-۱ آماده‌سازی تجهیزات در محل نمونه‌گیری

پژوهش مورد نظر در تصفیه‌خانه‌ی آب شماره ۳ مشهد انجام گرفته است. به منظور نمونه‌گیری و انجام آزمایش‌های مورد نیاز در پژوهش حاضر، ابتدا لازم است تا شرایط اخذ نمونه‌ها و تجهیزات مورد استفاده، آماده‌سازی شوند. به این منظور، آب مخزن سد بدون هیچ‌گونه عمل پیش‌تصفیه، به حوضچه‌ای هدایت شد و مولد میکرو-نانو حباب (میناب) در نزدیکی حوضچه مورد نظر قرار داده شد. سپس با انجام لوله‌کشی، مولد میناب، دستگاه ازن‌ساز و پمپ کف‌کش قرار گرفته در داخل حوضچه،

نصب سامانه مورد نیاز برای نمونه‌گیری و انجام آزمایش‌ها صورت پذیرفت. در شکل ۱-۳، طرح شماتیک سامانه نصب شده در محل تصفیه‌خانه نشان داده شده است.



شکل ۱-۳: طرح شماتیک سامانه نصب شده در محل تصفیه‌خانه

### ۳-۲-۲ آب‌گیری حوضچه

همان‌طور که قبلاً به آن اشاره شد، آزمایش‌ها باید بر روی آب خام ورودی از مخزن سد به داخل تصفیه‌خانه انجام شود. به این منظور، آب خام ورودی به تصفیه‌خانه آب بدون هیچ‌گونه عمل پیش‌تصفیه‌ای به حوضچه‌ای به طول و عرض ۲/۹ متر و ارتفاع ۲ متر که در شکل ۲-۳ نشان داده شده است، هدایت و تا ارتفاع ۱/۱۹ متری (معادل ۱۰ متر مکعب از حجم آن) پر شد.



شکل ۲-۳: نصب و لوله‌کشی تجهیزات در نزدیکی حوضچه مورد نظر

### ۳-۲-۳ مولد میکرو-نانو حباب

میکرو-نانو حباب‌های استفاده شده در این پژوهش با استفاده از روش کاویتاسیون هیدرودینامیکی توسط مولد میناب (شرکت نو فناوریان میناب طوس- ایران) که در شکل ۳-۳ نشان داده شده است، تولید شده است. در این مولد، آب به درون مولد میناب پمپاژ و در اثر تغییر فشار آب در حال جریان و تغییر سرعت، حباب‌ها تولید می‌شوند. اندازه ذرات میناب به میزان دبی ورودی به مولد میناب بستگی دارد. مولد میناب دارای ورودی و خروجی آب و یک لوله برای تزریق گاز است. مولد میناب مورد استفاده در این پژوهش، دارای دبی ورودی ۴۸۰ لیتر بر دقیقه است.



شکل ۳-۳: مولد میکرو-نانو حباب

### ۳-۲-۴ مولد ازن ساز

در این پژوهش از مولد ازن ساز بر پایه تولید ازن با کمک جرقه الکتریکی (Corona Discharge) استفاده شده است. روش کار در مولد ازن ساز به این صورت است که ولتاژ برق با استفاده از ترانسفورماتور ولتاژ بالا، افزایش می‌یابد و در الکتروود دستگاه، هزاران هزار بار در هر ثانیه تولید رعد و برق‌های کوچک می‌نماید و در نتیجه اکسیژن به ازن تبدیل می‌شود. در این پژوهش برای تولید ازن از گاز اکسیژن خالص استفاده شد و میزان نرخ گاز اکسیژن ورودی به مولد ازن ساز، پنج لیتر بر دقیقه

بوده است. برای انجام آزمایش‌ها از مولد ازن‌ساز (مدل COG5، شرکت فنون آردا سبز، ایران) که در شکل ۳-۴ آمده است، استفاده شده است و نرخ تولیدی ازن، پنج گرم ازن در هر ساعت بوده است.



شکل ۳-۴: تزریق گاز ازن توسط مولد ازن‌ساز به مولد میکرو-نانو حباب

### ۳-۳ نمونه‌گیری

تمام آزمایش‌ها در یک سامانه میکرو-نانو حباب ناپیوسته در روزهای مختلف سال انجام شده است. همان‌طور که اشاره شد، پس از هدایت آب به حوضچه مورد نظر، آب داخل حوضچه با پمپ کف‌کش با دبی ۴۸۰ لیتر بر دقیقه به مولد میناب پمپاژ و هم‌زمان گاز مورد نظر نیز تزریق شده است. این عملیات برای هر یک از گازهای هوا، اکسیژن و ازن به صورت جداگانه و در زمان‌های ۳۰، ۶۰، ۱۲۰ و ۱۸۰ دقیقه و نیز عملیات ترکیبی گازهای هوا و ازن (ابتدا ۳۰ دقیقه تزریق هوا و سپس ۳۰ دقیقه تزریق ازن) انجام شد و در هر مرحله نمونه‌گیری صورت گرفت. در شکل ۳-۵، میکرو-نانو حباب‌های تولیدی در آب نشان داده شده است. میزان گاز تزریقی هوا و اکسیژن به مولد میناب، پنج لیتر بر

دقیقه و میزان گاز اکسیژن ورودی به مولد ازن ساز نیز، پنج لیتر بر دقیقه تنظیم شده بود. پس از نمونه‌گیری و اندازه‌گیری دمای نمونه‌های آب، نمونه‌ها در دمای چهار درجه سانتی‌گراد نگهداری و آزمایش‌ها در مدت زمان حداکثر ۱۲ ساعت انجام شدند.



(ب)

(الف)

شکل ۳-۵: میکرو-نانو حباب‌های تولیدی در آب (الف) نمای دور و (ب) نمای نزدیک

### ۳-۴ فعالیت‌های آزمایشگاهی

پس از انجام نمونه‌گیری، نمونه‌های آب خام و آب دارای میناب‌های هوا، اکسیژن، ازن و ترکیب میناب‌های هوا و ازن، مورد آزمایش‌های گوناگون قرار گرفتند. در ادامه، روش انجام آزمایش‌های پارامترهای کیفی آب نظیر اندازه‌گیری دما، pH، TDS، کدورت و هدایت الکتریکی، شمارش تعداد انواع ریزموجودات، شمارش تعداد باکتری‌های هتروتروف (HPC)، آنالیز اندازه ذرات، پتانسیل زتا، SEM و آنالیز غلظت و زمان ماند ازن در آب، شرح داده شده است.

### ۳-۴-۱ اندازه‌گیری پارامترهای کیفی آب

برای اندازه‌گیری کدورت آب خام و آب دارای میکرو-نانو حباب از دستگاه کدورت‌سنج (مدل 2100N، شرکت HACH، آمریکا) که در شکل ۳-۶ نشان داده شده، استفاده شده است. برای اندازه‌گیری pH آب خام و آب دارای میناب از دستگاه pH متر (مدل inoLab pH7110، شرکت WTW، آلمان) و نیز

برای اندازه‌گیری هدایت الکتریکی (EC) و کل مواد جامد محلول (TDS) آب خام و آب دارای میناب از دستگاه هدایت‌سنج (مدل inoLab Cond7110، شرکت WTW، آلمان) استفاده شده است. در شکل ۳-۷، دستگاه‌های اندازه‌گیری pH، EC و TDS نشان داده شده است.



شکل ۳-۶: دستگاه کدورت‌سنج



(ب)



(الف)

شکل ۳-۷: (الف) دستگاه اندازه‌گیری pH (ب) دستگاه اندازه‌گیری EC و TDS

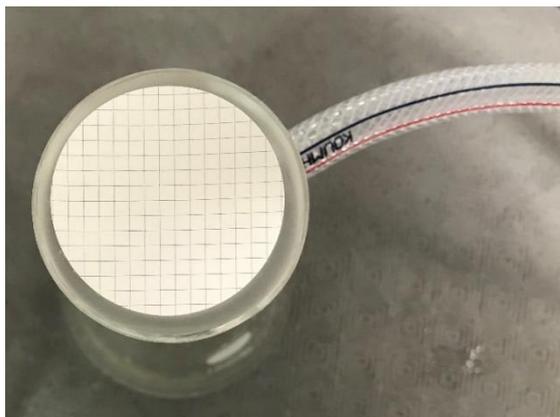
### ۳-۴-۲ شناسایی و شمارش تعداد ریزموجودات

پس از تزریق گازهای هوا، اکسیژن، ازن و ترکیب هوا و ازن با مولد میکرو-نانو حباب به آب خام ورودی به تصفیه‌خانه آب، شمارش تعداد و شناسایی انواع ریزموجودات، برای هر یک از نمونه‌های آب خام و آب تیمار شده، انجام شد. برای شمارش تعداد و شناسایی انواع ریزموجودات، از روش فیلتر غشائی و مشاهده مستقیم توسط میکروسکوپ نوری استفاده شد.

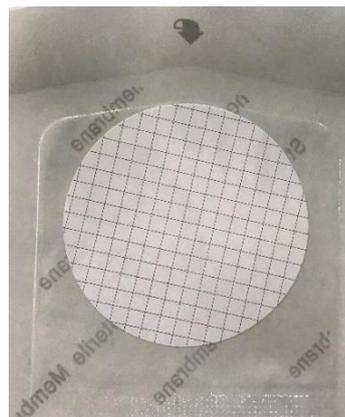
برای انجام آزمایش، ابتدا یک لیتر از نمونه آب مورد نظر با استفاده از دستگاه پمپ خلأ (مدل DV-42N-250، شرکت PLATINUM، آمریکا)، فیلتر فلاسک و فیلتر استریل غشائی سلولوز ترکیبی با قطر ۴۷ میلی‌متر و سایز حفره ۰/۴۵ میکرون (شرکت chm، اسپانیا) فیلتر شد [۵۸]. این مراحل در شکل ۳-۸ و شکل ۳-۹ نشان داده شده است.



شکل ۳-۸: پمپ خلأ و فیلتر فلاسک



(ب)



(الف)

شکل ۳-۹: (الف) فیلتر غشائی ۰/۴۵ میکرون (ب) فیلتر غشائی بر روی فیلتر فلاسک

پس از فیلتر کردن نمونه آب، مطابق با روش‌های استاندارد آزمون‌های آب و فاضلاب [۵۸]، فیلتر غشائی با دو میلی‌لیتر آب مقطر استریل شست و شو و یک میلی‌لیتر از آب شسته شده بر روی لام سدویک رفتار اقرار داده شد. سپس لام برای شناسایی و شمارش تعداد ریزموجودات، زیر میکروسکوپ نوری (مدل BS200، شرکت 3B Scientific، آلمان) با بزرگنمایی ۱۰۰ برابر، برای مشاهده مستقیم قرار گرفت که در شکل ۳-۱۰ نشان داده شده است. برای شمارش پلانکتون‌ها از لام سدویک رفتار استفاده شد. این لام دارای طول ۵۰ میلی‌متر، عرض ۲۰ میلی‌متر و عمق یک میلی‌متر است و به ۱۰۰۰ خانه با طول، عرض و عمق یک میلی‌متر تقسیم‌بندی شده است. برای شمارش، تعداد ریزموجودات روی خانه‌های موجود بر روی لام، شمارش می‌شود. برای شمارش فیتوپلانکتون‌ها، در نمونه‌هایی که دارای تعداد زیادی پلانکتون (هر خانه بیش از ۱۰ پلانکتون) هستند، تعداد مشخصی از خانه‌ها به صورت تصادفی انتخاب و طبق رابطه (۳-۱) محاسبه می‌شوند. همچنین برای شمارش زئوپلانکتون‌ها، در صورتی که تعداد آن‌ها بر روی لام کمتر از ۲۰۰ باشد، باید تمام ۱۰۰۰ خانه لام، شمارش شود [۵۸]. در این پژوهش، به دلیل تراکم بالای فیتوپلانکتون‌ها بر روی لام، ۱۰ خانه به

---

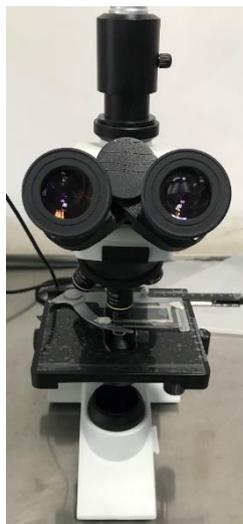
<sup>۱</sup>Sedgwick Rafter

<sup>۲</sup>Planktons

صورت تصادفی انتخاب شدند و تعداد ریزموجودات مطابق با رابطه (۱-۳) و رقت آزمایش شده، محاسبه گردید.

$$\text{No/mL} = \frac{C \times 1000 \text{ mm}^3}{A \times D \times F} \quad (1-3)$$

در رابطه بالا، C تعداد موجودات شمارش شده، A مساحت هر خانه ( $\text{mm}^2$ )، D عمق هر خانه (mm) و F تعداد خانه‌های شمارش شده است.



(ب)



(الف)

شکل ۱-۳: (الف) لام سدویک رfter (ب) میکروسکوپ نوری

### ۳-۴-۳ شمارش تعداد باکتری‌های هتروتروف (HPC)

شاخص‌های متعددی برای بررسی کیفیت میکروبی آب مورد استفاده قرار می‌گیرد و شمارش باکتری‌های هتروتروف به روش HPC، یکی از متداول‌ترین و کاربردی‌ترین آن‌ها است. باکتری‌های هتروتروف مجموعه‌ای از باکتری‌های هوازی و بی‌هوازی اختیاری هستند که برای رشد از مواد آلی تغذیه می‌کنند. باکتری‌های HPC طیف وسیعی از انواع باکتری‌ها را شامل می‌شوند و می‌توان به باکتری‌های بیماری‌زای اولیه و ثانویه مانند *Escherichia*، *Klebsiella*، *Enterobacter*، *Citrobacter* و *Serratia* که می‌توانند مشکلات زیادی را برای سلامتی انسان ایجاد کنند، اشاره کرد [۵۹]. به منظور شمارش تعداد باکتری‌های هتروتروف (HPC) و مقایسه میزان کاهش تعداد باکتری‌های

هتروتروف در نمونه آب خام و نمونه آب‌های دارای میکرو-نانو حباب گازهای هوا، اکسیژن، ازن و ترکیب میناب‌های هوا و ازن، پس از فیلتر کردن نمونه آب که در بخش قبل توضیح داده شد، یک میلی‌لیتر از آب شسته شده از فیلتر غشائی، برای انجام آزمایش HPC، مورد استفاده قرار گرفته است. به منظور انجام آزمایش HPC، ابتدا محیط کشت باکتری تهیه شد. مطابق با روش‌های استاندارد آزمون‌های آب و فاضلاب [۵۸]، جهت آماده‌سازی محیط کشت، محلول محیط کشت Plate Count Agar (شرکت ایبرسکو، ایران) به مقدار مورد نظر، به مدت ۱۵ دقیقه در دمای ۱۲۱ درجه سانتی‌گراد اتوکلاو و داخل پلیت‌های استریل یک‌بار مصرف به قطر هشت سانتی‌متر، ریخته می‌شود.

هر یک از نمونه‌های آب خام و آب دارای میناب هوا، اکسیژن، ازن و ترکیب هوا و ازن، با استفاده از سرم فیزیولوژی (محلول نه گرم سدیم-کلرید در ۱۰۰۰ میلی‌لیتر آب مقطر استریل) به ترتیب با رقت‌های ۰/۱، ۰/۰۱ و ۰/۰۰۱ رقیق شدند. سپس ۰/۱ میلی‌لیتر از نمونه‌های آب تهیه شده، با استفاده از سمپلر در پلیت‌های حاوی محیط کشت ریخته شدند. با استفاده از یک میله شیشه‌ای خم شده استریل، محلول آب بر روی سطح پلیت توزیع و اجازه داده شد تا محلول در محیط کشت آگار، جذب شود. در شکل ۳-۱۱ و شکل ۳-۱۲، مراحل انجام آزمایش HPC نشان داده شده است.



(ب)



(الف)

شکل ۳-۱۱: (الف) محلول محیط کشت Plate Count Agar (ب) محیط کشت‌های آماده شده در پلیت‌ها



شکل ۳-۱۲: نمونه‌های رقیق شده

پس از جذب محلول در محیط کشت، پلیت‌ها در انکوباتور با دمای ۳۵ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند و مدت زمان انکوباسیون ۴۸ ساعت در نظر گرفته شد. سپس تعداد کلنی‌های تشکیل شده در هر پلیت با روش استاندارد شمارش پلیت، شمارش و تعداد کل کلنی‌ها در هر میلی‌لیتر (CFU/mL) مطابق رابطه (۲-۳) محاسبه شد. محدوده‌ی تشخیص موثر تعداد کلنی‌ها، ۳۰ تا ۳۰۰ کلنی در هر پلیت است. در شکل ۳-۱۳، کلنی‌های تشکیل شده بر روی محیط کشت نشان داده شده است.



شکل ۳-۱۳: کلنی‌های تشکیل شده بر روی محیط کشت

$$\text{CFU/mL} = \frac{\text{تعداد کلنی‌های شمارش شده}}{\text{رقّت} \times \text{حجم محلول روی پلیت}} \quad (۲-۳)$$

مقایسه اثرات گندزدایی آب خام با استفاده از میناب‌های هوا، اکسیژن، ازن و ترکیب میناب‌های هوا و ازن، بر اساس مقیاس لگاریتمی اندازه‌گیری شد که نتایج به دست آمده از آن، در فصل ۴ ارائه گردیده است.

### ۳-۴-۴ شناسایی اولیه باکتری‌ها

رنگ‌آمیزی گرم<sup>۱</sup> متداول‌ترین روش رنگ‌آمیزی مورد استفاده برای شناسایی اولیه باکتری‌ها است. روش‌های مختلفی برای رنگ‌آمیزی گرم وجود دارد که در این پژوهش، مطابق با روش‌های استاندارد آزمون‌های آب و فاضلاب [۵۸]، از روش اصلاحی هاگر<sup>۲</sup> برای رنگ‌آمیزی استفاده شده است. ابتدا از نمونه بر روی لام، گسترش تهیه و تثبیت شد و سپس مراحل زیر به ترتیب جهت رنگ‌آمیزی انجام شد:

الف) رنگ‌آمیزی نمونه با محلول کریستال ویوله<sup>۳</sup> به مدت یک دقیقه

ب) شست و شوی لام با آب

پ) رنگ‌آمیزی نمونه با محلول لوگل<sup>۴</sup> به مدت یک دقیقه

ت) شست و شوی لام با آب

ث) رنگ‌بری نمونه با الکل استن<sup>۵</sup> به مدت ۳۰ ثانیه

ج) شست و شوی لام با آب

چ) رنگ‌آمیزی نمونه با سافرانین<sup>۱</sup> به مدت ۳۰ ثانیه

---

<sup>۱</sup>Gram

<sup>۲</sup>Hucker

<sup>۳</sup>Crystal Violet

<sup>۴</sup>Lugol

<sup>۵</sup>Acetone Alcohol

چ) شست و شوی لام با آب

پس از انجام مراحل رنگ‌آمیزی، لام در هوا خشک شد و لام در زیر میکروسکوپ نوری برای شناسایی باکتری‌ها قرار گرفت. برای شناسایی باکتری، باکتری‌های گرم مثبت، بنفش رنگ و باکتری‌های گرم منفی، قرمز هستند.

### ۳-۴-۵ انجام آزمایش SEM (Scanning Electron Microscope)

برای مشاهده تخریب سلول‌های ریزموجودات پس از تزریق گازهای هوا، اکسیژن و ازن با استفاده از میکرو-نانو حباب‌ها، از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) استفاده شد. برای تصویربرداری با میکروسکوپ الکترونی به محیط خلأ نیاز است. به همین دلیل پس از قرار دادن نمونه در محفظه، اتمسفر داخل ستون میکروسکوپ به کمک پمپ‌های موجود به خلأ مورد نیاز می‌رسد. وقتی که خلأ مورد نیاز حاصل شد، پرتو الکترونی تولید و توسط لنزهای الکترومغناطیسی باریک و روی نمونه متمرکز می‌شود. در حقیقت پرتوی الکترونی بر روی نمونه روبش می‌شود تا از نقاط مختلف آن اطلاعات به دست آید. در نتیجه برخورد پرتوی الکترونی با نمونه، سیگنال‌های مناسب تولید می‌شوند که توسط آشکارسازها دریافت و در نهایت به تصویر تبدیل می‌شوند.

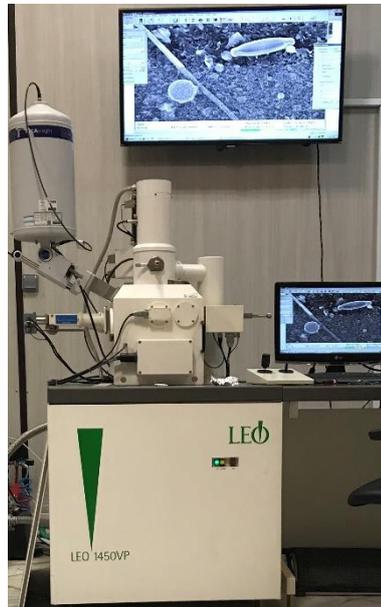
نمونه‌های آب دارای ریزموجودات برای انجام آزمایش SEM، از طریق فیلتر غشائی که در بخش‌های قبلی اشاره شد، فیلتر شده‌اند. سپس فیلتر غشائی در محلول بافر فسفات (PBS) قرار گرفت و با محلول ۲/۵ درصد گلووتارالدهید<sup>۲</sup> به مدت ۲ ساعت فیکس شد. در مرحله بعد، فیلتر با استفاده از PBS شسته و توسط غلظت‌های متوالی مختلف اتانول با استفاده از دستگاه خشک‌کن نقطه بحرانی، خشک شد. نمونه خشک شده با استفاده از دستگاه پاشش روکش، با طلا پوشانده شد [۲، ۵]. سپس

---

<sup>۱</sup>Safranin

<sup>۲</sup>Glutaraldehyde

از نمونه‌ها با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (مدل LEO 1450VP، آلمان) با ولتاژ ۳۰ کیلو-ولت (شکل ۳-۱۴)، عکس‌برداری شد. در این پژوهش، آزمایش SEM توسط آزمایشگاه مرکزی دانشگاه فردوسی مشهد انجام گرفته است.



شکل ۳-۱۴: میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)

### ۳-۴-۶ آنالیز اندازه ذرات

در فناوری نانو، اندازه ذرات و آنالیز آن‌ها در انجام پژوهش‌های مختلف، از اهمیت بسیاری برخوردار است. در این پژوهش نیز به منظور آنالیز اندازه ذرات میکرو-نانو حباب‌های استفاده شده برای گندزدایی آب خام، اندازه ذرات اندازه‌گیری شده است. توزیع اندازه و تعداد میکرو-نانو حباب‌های تولیدی با استفاده از دستگاه تعیین اندازه ذرات (مدل VASCO-3، شرکت CORDOUAN، فرانسه) که در شکل ۳-۱۵ نشان داده شده است، تعیین شده است. این دستگاه برای تعیین سایز ذرات از حرکت براونی سوسپانسیون استفاده می‌کند. در این دستگاه با تاباندن نور لیزر به سوسپانسیون در یک جهت خاص و با استفاده از نوسان شدت نور پراکنده و تحرک ذرات، می‌توان اندازه ذرات را با استفاده از فرمول استوکس-انیشیتین محاسبه کرد. محدوده اندازه‌گیری توزیع ذرات ۰/۵ تا ۶۰۰۰

نانومتر است. در این پژوهش، آنالیز اندازه ذرات در آزمایشگاه مرکزی دانشگاه فردوسی مشهد انجام شده است.



شکل ۳-۱۵: دستگاه آنالیز اندازه ذرات

### ۳-۴-۷ اندازه‌گیری پتانسیل زتا

به منظور بررسی تحرک پذیری و پایداری میکرو-نانو حباب‌ها، پتانسیل زتا اندازه‌گیری می‌شود. در این پژوهش، پتانسیل زتا میکرو-نانو حباب‌ها با استفاده از دستگاه تعیین پتانسیل زتا (مدل Zeta Compact، شرکت CAD، فرانسه) اندازه‌گیری شده که در شکل ۳-۱۶ نشان داده شده است. ویژگی‌های شارژ لایه‌ای میکرو-نانو حباب‌ها بر اساس توزیع تحرکات الکتروفوریتیک با استفاده از یک الگوریتم ردیابی بهینه‌سازی شده، اندازه‌گیری شده است. محدوده اندازه‌گیری پتانسیل زتا، ۱۵۰- تا ۱۵۰+ میلی‌ولت بود. در این پژوهش، اندازه‌گیری پتانسیل زتا در آزمایشگاه مرکزی دانشگاه فردوسی مشهد صورت پذیرفته است.



شکل ۳-۱۶: دستگاه اندازه‌گیری پتانسیل زتا

### ۳-۴-۸ اندازه‌گیری غلظت و زمان ماند ازن در آب

در آزمایش‌هایی که از گاز ازن به منظور گندزدایی در صنعت آب و فاضلاب استفاده می‌شود، به دلیل اینکه گاز ازن پایداری نسبتاً کمی دارد، میزان زمان ماند ازن در محلول اهمیت بالایی پیدا می‌کند. در این پژوهش، پس از تزریق میکرو-نانو حباب ازن به آب خام، غلظت ازن محلول در آب با استفاده از دستگاه ازن‌متر (مدل Soft case kit PTS043، شرکت Palintest، انگلستان) در زمان‌های مختلف اندازه‌گیری شده است. میزان غلظت ازن نیز با استفاده از روش DPD تعیین شده است. محدوده اندازه‌گیری دستگاه ازن‌متر، صفر تا سه میلی‌گرم بر لیتر و طول موج ۵۳۰ نانومتر بوده است.

این دستگاه بر اساس اندازه‌گیری شدت رنگ تولید شده توسط معرف شرکت Palintest و استفاده از فتومترهای دستگاه، عمل می‌کند. فتومترهای دستگاه با مقایسه لوله شامل آب تصفیه نشده و نمونه آبی که به آن معرف اضافه شده است، میزان غلظت را محاسبه می‌کنند. برای انجام آزمایش، ابتدا لوله‌های شیشه‌ای با آب مقطر شست و شو داده شده و به خوبی با دستمال تمیز خشک می‌شوند. ابتدا لوله شیشه‌ای با آب خام به میزان ۱۰ میلی‌لیتر پر شده و داخل دستگاه قرار گرفته و دستگاه صفر شده است. سپس چند قطره از نمونه میناب ازن داخل لوله شیشه‌ای دیگر ریخته شد و قرص معرف DPD 4، به طور کامل درون لوله شیشه‌ای خرد شد و پس از آن ۱۰ میلی‌لیتر از نمونه، داخل لوله شیشه‌ای اضافه گردید. سپس درپوش لوله شیشه‌ای گذاشته و محلول ترکیب شد. در مرحله بعد، لوله

شیشه‌ای داخل دستگاه قرار گرفت و میزان غلظت ازن قرائت شد. قرص معرف DPD 4، در ترکیب با ازن، رنگ صورتی تولید می‌کند. در شکل ۳-۱۷ دستگاه ازن‌متر و قرص معرف DPD 4 نشان داده شده است.



(ب)



(الف)

شکل ۳-۱۷: (الف) دستگاه ازن‌متر (ب) قرص معرف DPD 4

### ۳-۵ جمع‌بندی

در این فصل، ابتدا فعالیت‌های میدانی مانند آماده‌سازی تجهیزات و سپس فعالیت‌های آزمایشگاهی مانند اندازه‌گیری پارامترهای کیفی آب، شناسایی و شمارش تعداد ریزموجودات، شمارش تعداد باکتری‌های هتروتروف، شناسایی باکتری‌ها، آزمایش SEM، آنالیز اندازه ذرات، اندازه‌گیری پتانسیل زتا و اندازه‌گیری غلظت و زمان ماند ازن در آب، مورد بررسی قرار گرفت. در فصل بعد، نتایج به دست آمده از انجام آزمایش‌ها، به تفصیل مورد بحث قرار گرفته است.

## فصل ۲ : نتایج و بحث

## ۴-۱ مقدمه

در این فصل نتایج حاصل از بازدهی حذف ریزموجودات و باکتری‌های هتروتروف در آب خام ورودی به تصفیه‌خانه آب با استفاده از میکرو-نانو حباب‌های هوا، اکسیژن، ازن و ترکیب هوا و ازن، مورد بررسی قرار گرفته است. به همین منظور، ابتدا پارامترهای کیفی آب، بررسی اندازه میکرو-نانو حباب‌ها، بررسی پتانسیل زتا بررسی شده و سپس شناسایی ریزموجودات، شمارش تعداد ریزموجودات در آب خام و آب دارای میناب‌های هوا، اکسیژن، ازن و ترکیب میناب‌های هوا و ازن، تحلیل آزمایش SEM، شمارش باکتری‌های هتروتروف، شناسایی باکتری‌ها و تحلیل غلظت و زمان ماند ازن در آب، ارائه شده است.

## ۴-۲ بررسی پارامترهای کیفی آب

پارامترهای کیفی آب به منظور بررسی تغییرات در پارامترها بعد از تزریق میناب‌های هوا، اکسیژن، ازن و ترکیب میناب‌های هوا و ازن اندازه‌گیری شده است. پارامترهای کیفی نمونه‌های آب نظیر دما، pH، کدورت، هدایت الکتریکی (EC) و کل مواد جامد محلول (TDS) برای آب خام در مقایسه با آب دارای میناب‌های هوا، اکسیژن، ازن و ترکیب میناب‌های هوا و ازن در جدول ۴-۱، جدول ۴-۲، جدول ۴-۳ و جدول ۴-۴ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تزریق میناب هوا، اکسیژن، ازن و ترکیب هوا و ازن، موجب کاهش کدورت آب و TDS شده و افزایش pH و EC را به همراه داشته است. نتایج نشان داده است که استفاده از میناب، منجر به تولید رادیکال  $\text{OH}^-$  شده که می‌تواند افزایش pH را در بر داشته باشد [۴۰].

جدول ۱-۴: پارامترهای کیفی آب خام و میناب هوا

میناب هوا			آب خام		
میانگین	محدوده	پارامتر	میانگین	محدوده	پارامتر
۱۹/۸	۱۴/۹-۲۴/۶	دما (C°)	۱۹/۹	۱۴/۸-۲۵	دما (C°)
۸/۰۵	۷/۹۵-۸/۱۴	pH	۷/۹۷	۷/۹۲-۸/۰۲	pH
۲/۲۷	۰/۸۲-۳/۷۱	کدورت (NTU)	۲/۵	۰/۹۴-۴/۰۵	کدورت (NTU)
۱۰۵۳/۵	۱۰۰۵-۱۱۰۲	EC (μS/cm)	۱۰۴۶	۱۰۰۰-۱۰۹۲	EC (μS/cm)
۶۳۸	۶۱۰-۶۶۶	TDS (mg/L)	۶۴۰	۶۱۱-۶۶۹	TDS (mg/L)

جدول ۲-۴: پارامترهای کیفی آب خام و میناب اکسیژن

میناب اکسیژن			آب خام		
میانگین	محدوده	پارامتر	میانگین	محدوده	پارامتر
۲۱/۱	۱۹/۲-۲۳	دما (C°)	۲۰/۸	۱۷/۵-۲۴	دما (C°)
۸/۰۴	۷/۹۳-۸/۱۴	pH	۷/۹۷	۷/۹۳-۸	pH
۱/۸۳	۰/۸۵-۲/۸	کدورت (NTU)	۲/۴۷	۰/۸۳-۴/۱	کدورت (NTU)
۱۰۲۷	۹۸۶-۱۰۶۸	EC (μS/cm)	۱۰۲۳/۵	۹۸۰-۱۰۶۷	EC (μS/cm)
۶۲۵	۵۹۸-۶۵۲	TDS (mg/L)	۶۲۶/۵	۶۰۲-۶۵۱	TDS (mg/L)

جدول ۳-۴: پارامترهای کیفی آب خام و میناب ازن

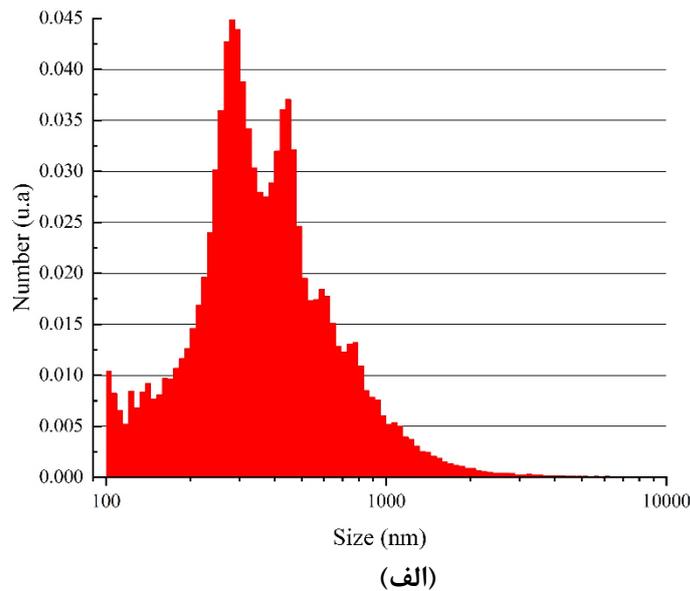
میناب ازن			آب خام		
میانگین	محدوده	پارامتر	میانگین	محدوده	پارامتر
۱۹	۱۵-۲۳	دما (C°)	۱۸/۹	۱۵/۸-۲۲	دما (C°)
۸/۰۱	۷/۸۹-۸/۱۳	pH	۷/۹۵	۷/۸۷-۸/۰۳	pH
۱/۴۳	۱/۱۷-۱/۶۹	کدورت (NTU)	۱/۷۲	۱/۲۲-۲/۲۱	کدورت (NTU)
۱۰۲۸/۵	۹۷۸-۱۰۷۹	EC (μS/cm)	۱۰۰۹/۵	۹۵۸-۱۰۶۱	EC (μS/cm)
۶۱۶/۵	۵۸۴-۶۴۹	TDS (mg/L)	۶۲۸/۵	۵۹۷-۶۶۰	TDS (mg/L)

جدول ۴-۴: پارامترهای کیفی آب خام و ترکیب میناب هوا و ازن

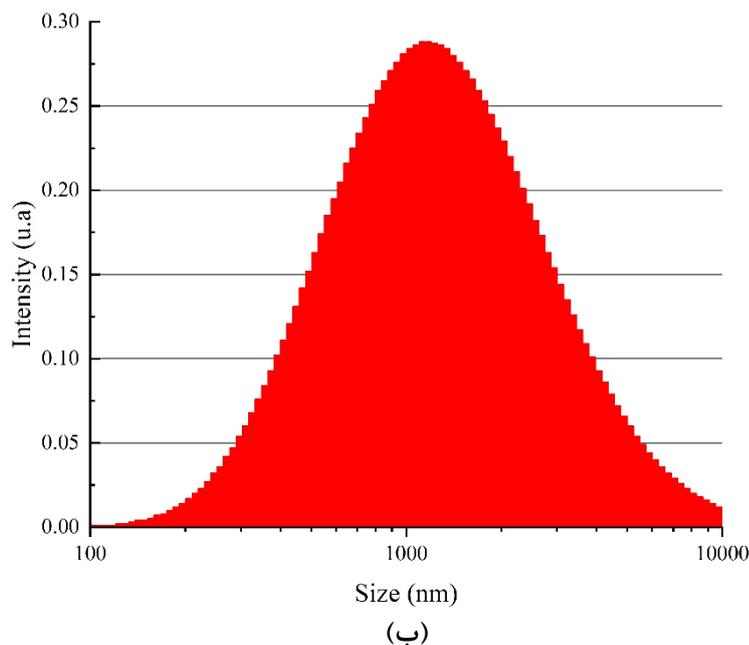
میناب هوا و ازن			آب خام		
میانگین	محدوده	پارامتر	میانگین	محدوده	پارامتر
۱۷	۱۶-۱۸	دما (C°)	۱۶	۱۵-۱۷	دما (C°)
۸/۲۹	۸/۲۶-۸/۳۳	pH	۸/۲۲	۸/۱۵-۸/۲۹	pH
۱/۴۵	۱/۳۲-۱/۵۷	کدورت (NTU)	۱/۶۱	۱/۴۱-۱/۸۰	کدورت (NTU)
۹۵۸/۵	۹۲۰-۹۹۷	EC (μS/cm)	۹۱۲	۸۹۵-۹۲۹	EC (μS/cm)
۵۵۶/۵	۵۴۶-۵۶۷	TDS (mg/L)	۵۶۰/۵	۵۴۷-۵۷۴	TDS (mg/L)

## ۴-۳ بررسی توزیع اندازه میکرو-نانو حباب‌ها

اندازه میکرو-نانو حباب، عامل اصلی مؤثر بر بازده انتقال جرم است. حباب‌های کوچکتر، سطح ویژه و فشار درونی بیشتری دارند و می‌توانند مدت زمان بیشتری پایدار بمانند. به عنوان نمونه، توزیع اندازه ذرات میکرو-نانو حباب‌های تولیدی توسط مولد میناب با گاز اکسیژن، اندازه‌گیری و در شکل ۴-۱ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۴-۱-الف مشاهده می‌شود، محدوده اندازه ذرات ۱۰۲ تا ۹۷۷۵ نانومتر به دست آمده است و قطر متوسط ذرات بر اساس تعداد، برابر با ۴۳۵/۱۱ نانومتر است. مطابق شکل ۴-۱-ب، قطر متوسط ذرات بر اساس شدت پراکندگی، برابر با ۱۶۶۰/۴۴ نانومتر تعیین شده است.



شکل ۴-۱: توزیع اندازه میکرو-نانو حباب اکسیژن بر اساس (الف) تعداد

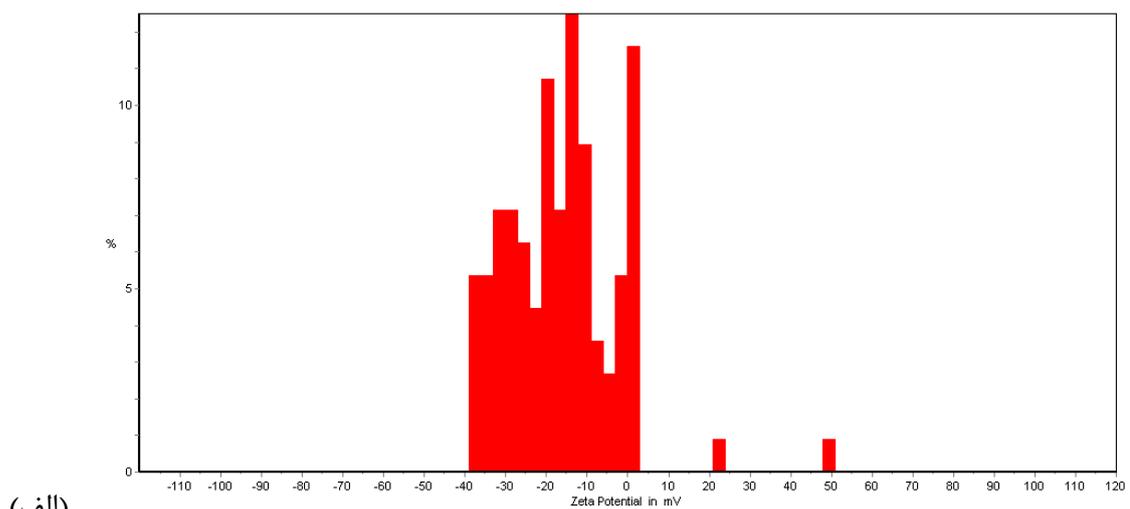


شکل ۴-۱ (ادامه): توزیع اندازه میکرو-نانو حباب اکسیژن بر اساس (ب) شدت

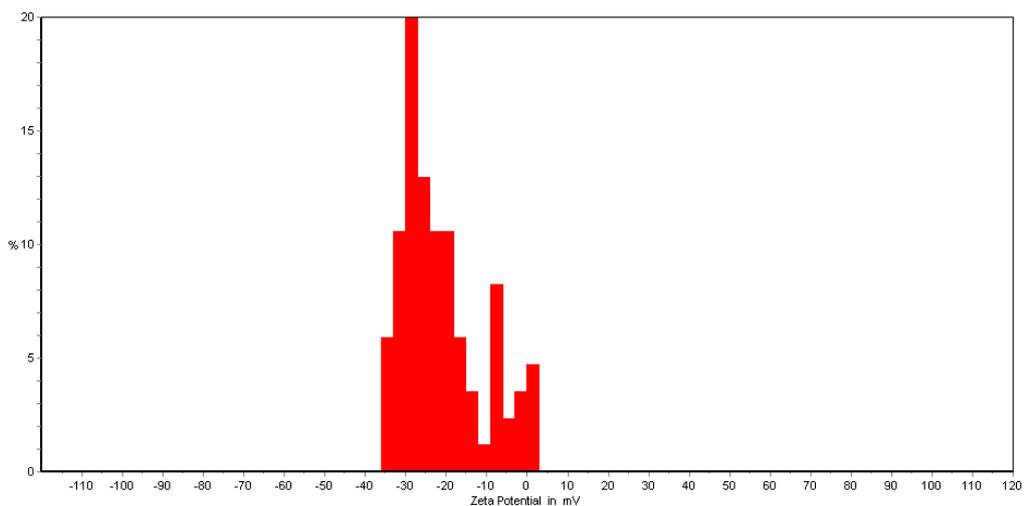
## ۴-۴ بررسی پتانسیل زتا در میکرو-نانو حبابها

هر ذره در محیط سیال دارای بار سطحی است و همواره در اطراف سطح ذره، غلظت یون‌های با بار مخالف سطح ذره، افزایش می‌یابد. یون‌های سطح ذره توسط لایه‌ای اضافی، احاطه می‌شوند و لایه اضافه دیگری در دور ذره ایجاد می‌شود. لایه به وجود آمده دور ذره را می‌توان به دو لایه درونی و بیرونی تقسیم کرد. در لایه درونی، یون‌ها به صورت کاملاً متراکم در کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند و در لایه بیرونی، یون‌ها توانایی جا به جایی بیشتری نسبت به لایه درونی را دارند. زمانی که ذره در سیال حرکت می‌کند، لایه‌های درونی و بیرونی اطراف آن نیز جا به جا می‌شوند و می‌توان یک فاصله فرضی میان ذره و محیط سیال در نظر گرفت. این فاصله را در اصطلاح فاصله هیدرودینامیکی می‌نامند و پتانسیل موجود در این فاصله، پتانسیل زتا در نظر گرفته می‌شود. در تعیین اندازه پتانسیل زتا، pH سوسپانسیون اهمیت دارد و به طور کلی، مرز پایداری و ناپایداری سوسپانسیون، به وسیله‌ی پتانسیل زتا تعیین می‌شود. ذراتی که پتانسیل زتای آن‌ها از +۳۰ میلی‌ولت بیشتر و یا از -۳۰ میلی‌ولت کمتر باشد، پایدار در نظر گرفته می‌شود [۶۰]. به عنوان نمونه، پتانسیل زتا برای نمونه آب خام و نمونه آب

دارای میناب اکسیژن اندازه‌گیری شده است. همان‌طور که در شکل ۴-۲-الف مشاهده می‌شود، میانگین پتانسیل زتا برای آب خام در pH معادل ۸ برابر با ۱۶/۹۳- میلی ولت است. مطابق شکل ۴-۲-ب میانگین پتانسیل زتا برای آب دارای میناب اکسیژن در pH معادل ۸/۰۴ برابر با ۲۱/۱۳- به دست آمده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که پس از تزریق میناب اکسیژن به آب خام، پتانسیل زتا افزایش یافته و نمونه آب نسبت به حالت اولیه پایدارتر شده است. با توجه به این‌که پتانسیل زتا به مقادیر یون‌های  $H^+$  و  $OH^-$  بستگی دارد، با افزایش pH پتانسیل زتا افزایش می‌یابد [۱۶].



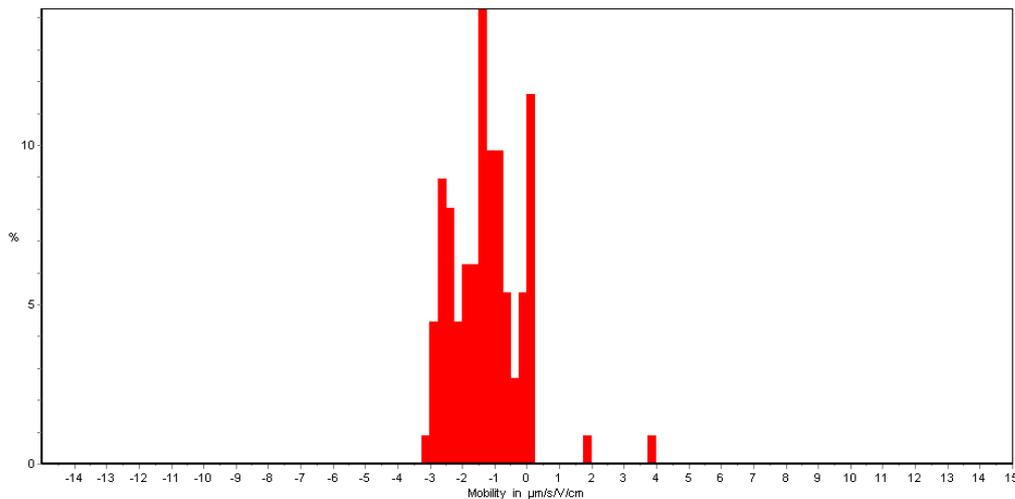
(الف)



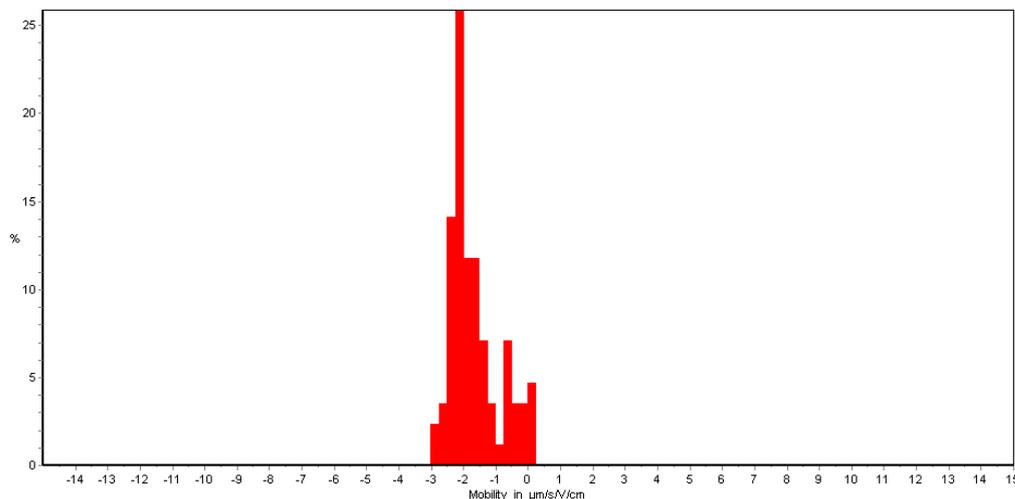
(ب)

شکل ۴-۲: تغییرات پتانسیل زتای (الف) آب خام (pH=8) و (ب) آب دارای میکرو-نانو حباب اکسیژن (pH=8.04)

تحرك ذرات در آب خام و آب داراي مينا ب اكسيژن نيز اندازه گيري شده است. همان طور كه در شكل ۳-۴ الف مشاهده مي شود، متوسط تحرك پذيري ذرات در آب خام برابر با  $1/28 \mu\text{m/s/V/cm}$  - به دست آمده است. مطابق شكل ۳-۴ ب، متوسط تحرك پذيري ذرات در آب داراي مينا ب اكسيژن برابر با  $1/66 \mu\text{m/s/V/cm}$  - است. نتايج نشان مي دهد كه تزريق مينا ب اكسيژن به آب خام، منجر به افزايش تحرك پذيري ذرات مي شود.



(الف)



(ب)

شكل ۳-۴: تغييرات تحرك پذيري ذرات در (الف) آب خام ( $\text{pH}=8$ ) و (ب) آب داراي ميكرو-نانو حباب اكسيژن ( $\text{pH}=8.04$ )

## ۴-۵ شناسایی ریز موجودات

همان‌طور که در فصل قبل به آن اشاره شد، پس از فیلتر کردن نمونه‌های آب، لام برای مشاهده مستقیم در زیر میکروسکوپ نوری قرار گرفته و ریزموجودات در نمونه‌های آب، شناسایی و شمارش شده‌اند که در ادامه برخی از ویژگی‌های آن‌ها به طور مختصر شرح داده شده است.

موجودات بر اساس تکامل به دو دسته پروکاریوت<sup>۱</sup> و یوکاریوت<sup>۲</sup> تقسیم‌بندی می‌شوند. پروکاریوت‌ها دارای ابعاد سلولی یک تا پنج میکرون، ناحیه هسته‌ای و یک کروموزوم هستند که از جمله می‌توان به تمام باکتری‌های یک و چند سلولی و نیز جلبک‌های سبز-آبی اشاره کرد. یوکاریوت‌ها دارای ابعاد سلولی ۱۰ تا ۱۰۰ میکرون، هسته حقیقی و چند کروموزوم هستند و قارچ‌ها، جلبک‌ها (به جز جلبک سبز-آبی) و پروتوزوئرها<sup>۳</sup> را شامل می‌شوند.

موجودات آبزی، انواع پلانکتون‌ها<sup>۴</sup> را شامل می‌شوند. پلانکتون‌ها موجودات میکروسکوپی آبزی هستند که مقاومت کمی در برابر حرکت دارند و به صورت شناور آزاد در آب‌های طبیعی زندگی می‌کنند. پلانکتون‌ها را می‌توان به فیتوپلانکتون<sup>۵</sup> و زئوپلانکتون<sup>۶</sup> تقسیم‌بندی نمود. فیتوپلانکتون‌ها جلبک‌های میکروسکوپی هستند که به صورت اشکال تک‌سلولی، کلنی یا رشته‌ای وجود دارند. بیشتر آن‌ها فتوسنتزی هستند و توسط زئوپلانکتون‌ها یا سایر موجودات آبزی تغذیه‌کننده خورده می‌شوند. زئوپلانکتون‌ها عمدتاً از پروتوزوئرها، روتیفرها<sup>۷</sup> و کلادوسرها<sup>۸</sup> تشکیل شده‌اند [۵۸].

---

<sup>۱</sup>Prokaryote

<sup>۲</sup>Eukaryote

<sup>۳</sup>Protozoans

<sup>۴</sup>Planktons

<sup>۵</sup>Phytoplankton

<sup>۶</sup>Zooplankton

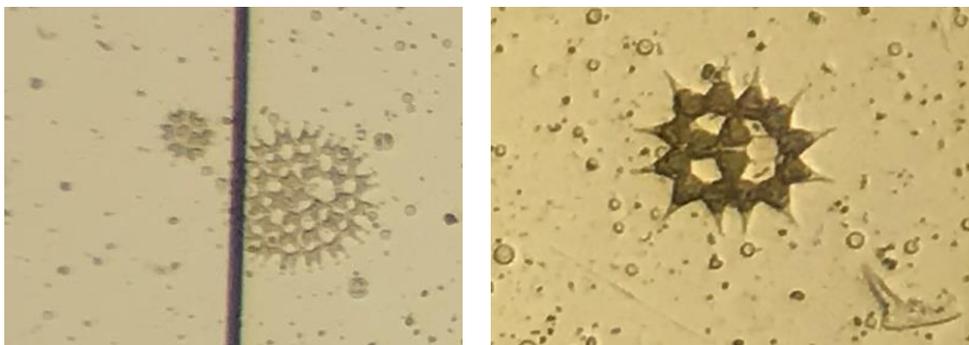
<sup>۷</sup>Rotifers

<sup>۸</sup>Cladocerans

در این پژوهش، در نمونه‌های آب، ریزموجودات زیر شناسایی شدند که در ادامه معرفی شده‌اند:

### الف) جلبک سبز

در نمونه‌های آب، انواع جلبک سبز شناسایی و شمارش شدند. جلبک‌های سبز با حدود ۱۷۰۰۰ گونه شناخته شده، متنوع‌ترین گروه جلبک‌ها هستند. جلبک‌های سبز (کلروفیتا) در محدوده اندازه‌ای موجودات تک سلولی میکروسکوپی تا کلنی‌های کروی بزرگ و رشته‌های گسترده، قرار دارند. آن‌ها به دلیل وجود کلروفیل a و b، با رنگ سبز مشخص می‌شوند [۶۱]. شکل ۴-۴، دو جلبک سبز *Tetraedron* و *Pediastrum* از جلبک‌های سبز شناسایی شده در نمونه‌های آب را نشان می‌دهد.



(ب)

(الف)

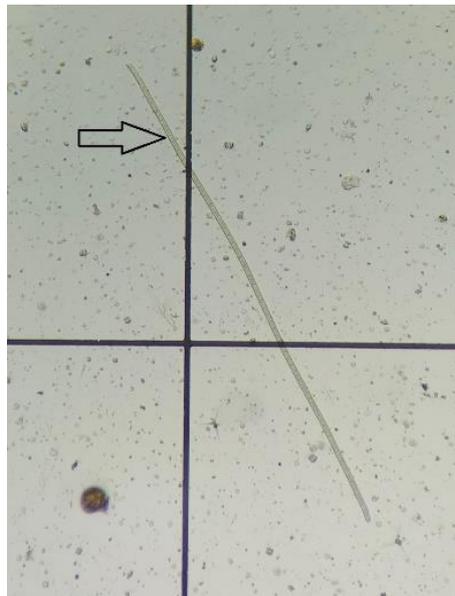


(پ)

شکل ۴-۴: الف) و (ب) جلبک سبز *Pediastrum* (پ) جلبک سبز *Tetraedron*

## ب) جلبک سبز-آبی

در نمونه‌های آب، جلبک‌های سبز-آبی نیز شناسایی و شمارش شدند. جلبک‌های سبز-آبی (سیانوباکتری) به طور گسترده در محیط‌های آب شیرین وجود دارند. محدوده اندازه آن‌ها از اشکال تک‌سلولی مانند *Synechococcus* تا جلبک‌های بزرگ مانند *Microcystis* و *Anabaena* قرار دارد. تعادل رنگ‌دانه‌های فتوسنتزی موجود در جلبک‌های سبز-آبی، از نظر طیف و شدت نور متفاوت است و طیف وسیعی از رنگ‌ها، از قهوه ای تا سبز-آبی را شامل می‌شود. این جلبک‌ها عامل اصلی تولید کننده سم، طعم و بو در منابع آبی هستند [۶۱]. در شکل ۴-۵، جلبک سبز-آبی *phormidium* از جلبک‌های سبز-آبی شناسایی شده در نمونه‌های آب، نشان داده شده است.



شکل ۴-۵: جلبک سبز-آبی *phormidium*

## ب) داینوفیتا<sup>۲</sup>

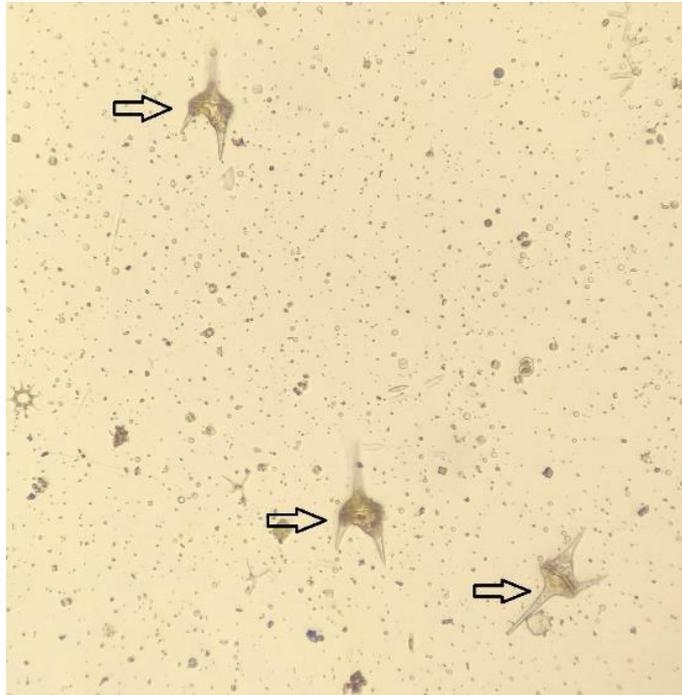
انواعی از داینوفیتاها نیز در نمونه‌های آب، شناسایی و شمارش شدند. اکثر داینوفیتاها، جلبک‌های تک‌سلولی دو تاژکی هستند. داینوفیتاها دارای کلروفیل‌های a و c هستند؛ اما به دلیل وجود بیشتر

---

<sup>۱</sup>Cyanobacteria

<sup>۲</sup>Dinophyta

کاروتن<sup>۱</sup> و پریدینین<sup>۲</sup> رنگ آن‌ها طلایی یا قهوه‌ای است. در میان انواع داینوفیتاها، *Ceratium* و *Peridinium* از نظر جغرافیایی به طور گسترده‌ای پراکنده شده‌اند [۶۱]. در شکل ۴-۶ گونه *Ceratium* شناسایی شده در نمونه های آب، نشان داده شده است.



شکل ۴-۶: گونه *Ceratium* شناسایی شده در آب

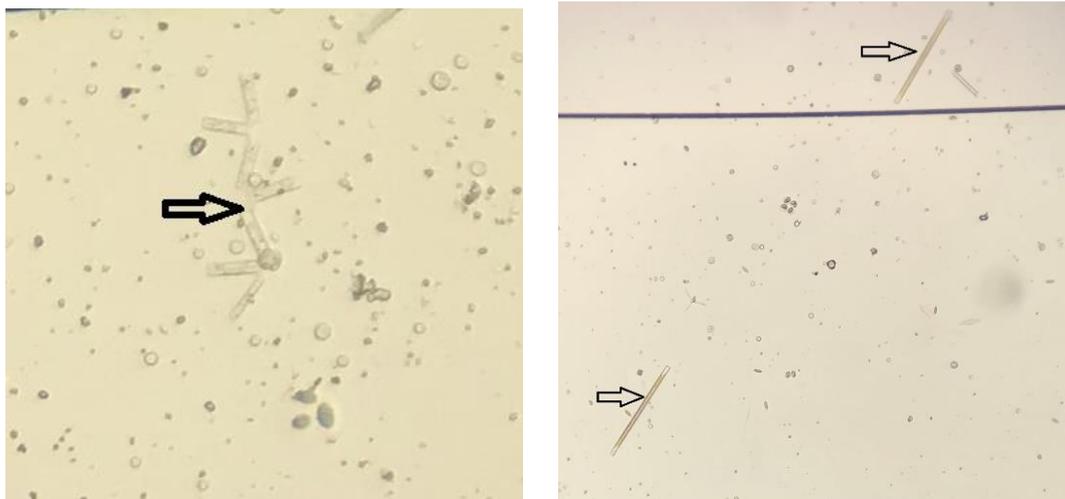
### ت) دیاتومه<sup>۳</sup>

در نمونه‌های آب، دیاتومه‌ها نیز قابل شناسایی و شمارش بوده‌اند. دیاتومه‌ها جلبک‌های تک‌سلولی، کلنی یا رشته‌ای هستند که با داشتن کلروپلاست‌های طلایی و دیواره‌های سلولی ساخته شده از سیلیس، مشخص می‌شوند. دیواره سلول غالباً با پلی‌ساکارید احاطه شده است که ممکن است گسترش یابد و ساقه‌هایی را ایجاد کند که برای اتصال سلول‌ها به سطوح استفاده می‌شود [۶۱]. در شکل ۴-۷، دو مورد از دیاتومه‌های شناسایی شده (*Tabellaria* و *Synedra*) نشان داده شده است.

<sup>۱</sup>Carotene

<sup>۲</sup>Peridinin

<sup>۳</sup>Diatom



(ب)

(الف)

شکل ۴-۷ (الف) دیاتومه *Synedra* (ب) دیاتومه *Tabellaria*

### ث) نماتودا<sup>۱</sup>

در نمونه‌های آب، انواعی از نماتودها نیز قابل شناسایی و شمارش بوده‌اند که در شکل ۴-۸، نماتودهای موجود در آب خام نشان داده شده است. نماتودها، کرم‌هایی جدا نشده، با بدنه استوانه‌ای کشیده هستند. آن‌ها در سراسر جهان در آب‌های شیرین، شور و خاک وجود دارند. انواعی که در آب به صورت آزاد زندگی می‌کنند، بسیار کوچک هستند و حداکثر طول آن‌ها به حدود ۱۰۰۰ میکرومتر می‌رسد. نماتودها می‌توانند در صورت گندزدایی با کلر زنده بمانند. معمولاً نمونه‌هایی که در آب آشامیدنی یافت می‌شوند، برای انسان بیماری‌زا نیستند؛ اما می‌توانند عوامل بیماری‌زای انسانی مانند باکتری‌ها و ویروس‌ها را بلعیده و باعث بیماری شوند. روش‌های معمول تصفیه آب، در حذف نماتودها از آب آشامیدنی چندان کارآمد نیستند و مقاومت آن‌ها در برابر گندزداهای معمولی قابل توجه است [۶۲].

<sup>۱</sup>Nematode



(ب)



(الف)

شکل ۴-۸: (الف) و (ب) نماتودهای شناسایی شده در آب خام

### ج) روتیفر<sup>۱</sup>

گونه‌هایی از روتیفرها نیز در نمونه‌های آب، مشاهده و شمارش شدند. روتیفرها، گروهی از حدود ۱۵۰۰ گونه بی‌مهرگان آبی میکروسکوپی را تشکیل می‌دهند. وجود آنها نشان‌دهنده‌ی سطح بالای مواد مغذی و اکسیژن محلول در آب است. روتیفرها موجودات چند سلولی هستند و درصد زیادی از پلانکتون‌های آب شیرین را تشکیل می‌دهند. آنها دارای ساختار قیفی مشخص و حلقه‌های تاژی هستند و شبیه چرخ‌هایی هستند که به سرعت در حال حرکت هستند [۶۲]. در شکل ۴-۹ گونه شناسایی شده *Keratella* نشان داده شده است.



(ب)



(الف)

شکل ۴-۹: (الف) و (ب) گونه *Keratella* شناسایی شده در آب خام

<sup>۱</sup>Rotifer

## چ) کراستاسه<sup>۱</sup>

در نمونه‌های آب، گونه‌هایی از کراستاسه‌ها نیز مشاهده و شمارش شدند. کراستاسه‌ها یک دسته از گونه‌های آبی هستند که به دلیل اندازه نسبتاً بزرگشان، می‌توانند موجب طعم، بو و تغییر رنگ نامطلوب در آب شوند. کراستاسه‌ها به راسته‌های Amphipoda و Isopoda، Copepoda، Cladocera تقسیم می‌شوند. Cladocera دارای یک پوشش پوسته‌ای سخت و طول ۰/۲۵ تا سه میلی‌متر است. راسته Copepoda دارای ابعاد کوچکتر از یک میلی‌متر است و تخم‌های آن می‌توانند از فیلترهای آب عبور کنند و در سیستم‌های آب تکثیر شوند. Isopoda دارای ابعاد پنج تا ۱۵ میلی‌متر است و در مخازن آب یافت می‌شود. راسته Amphipoda شبیه Cladocera است و می‌تواند وارد فیلترها شده و بازدهی فرآیندهای فیلتراسیون را کاهش دهد [۶۲]. در شکل ۴-۱۰ کراستاسه‌های راسته Copepoda که در آب خام شناسایی شده، نشان داده شده است.



(ب)



(الف)

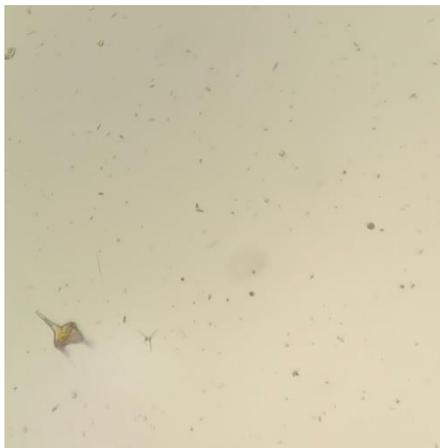
شکل ۴-۱۰: (الف) و (ب) کراستاسه‌های راسته Copepoda در آب خام

---

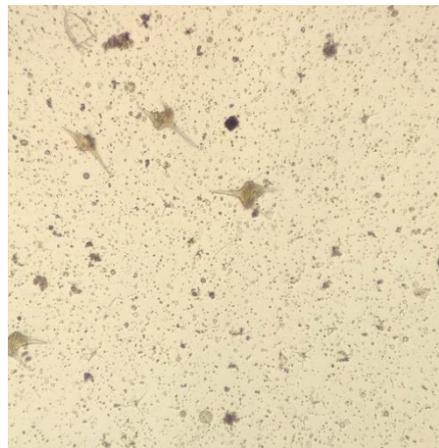
<sup>۱</sup>Crustacea

## ۴-۶ تأثیر میکرو-نانو حباب‌ها بر تعداد ریزموجودات

برای بررسی اثر تزریق میناب هوا، اکسیژن، ازن و ترکیب میناب هوا و ازن بر کاهش تعداد ریزموجودات در آب خام، آزمون شرح داده شده در فصل گذشته، در زمان‌های ۳۰، ۶۰، ۱۲۰ و ۱۸۰ دقیقه سه بار تکرار و از نتایج به دست آمده میانگین‌گیری شد. علاوه بر این، انحراف معیار نتایج هر یک از آزمون‌ها در مقایسه با میانگین نتایج محاسبه شد. همان‌طور که قبلاً به آن اشاره شد، نرخ ورودی گاز هوا و اکسیژن پنج لیتر بر دقیقه و نرخ تولیدی گاز ازن پنج گرم بر ساعت به مولد میناب بوده و حجم آب نیز ثابت در نظر گرفته شده است. میکرو-نانو حباب‌ها می‌توانند تأثیر قابل توجهی در کاهش تراکم ریزموجودات در آب خام داشته باشند که در شکل ۴-۱۱، اثر میناب ازن، قبل و پس از تزریق ازن در کاهش تراکم سلولی ریزموجودات، قابل مشاهده است. در ادامه به بررسی اثرات تزریق هر گاز بر کاهش تعداد ریزموجودات شناسایی شده، پرداخته شده است.



(ب)



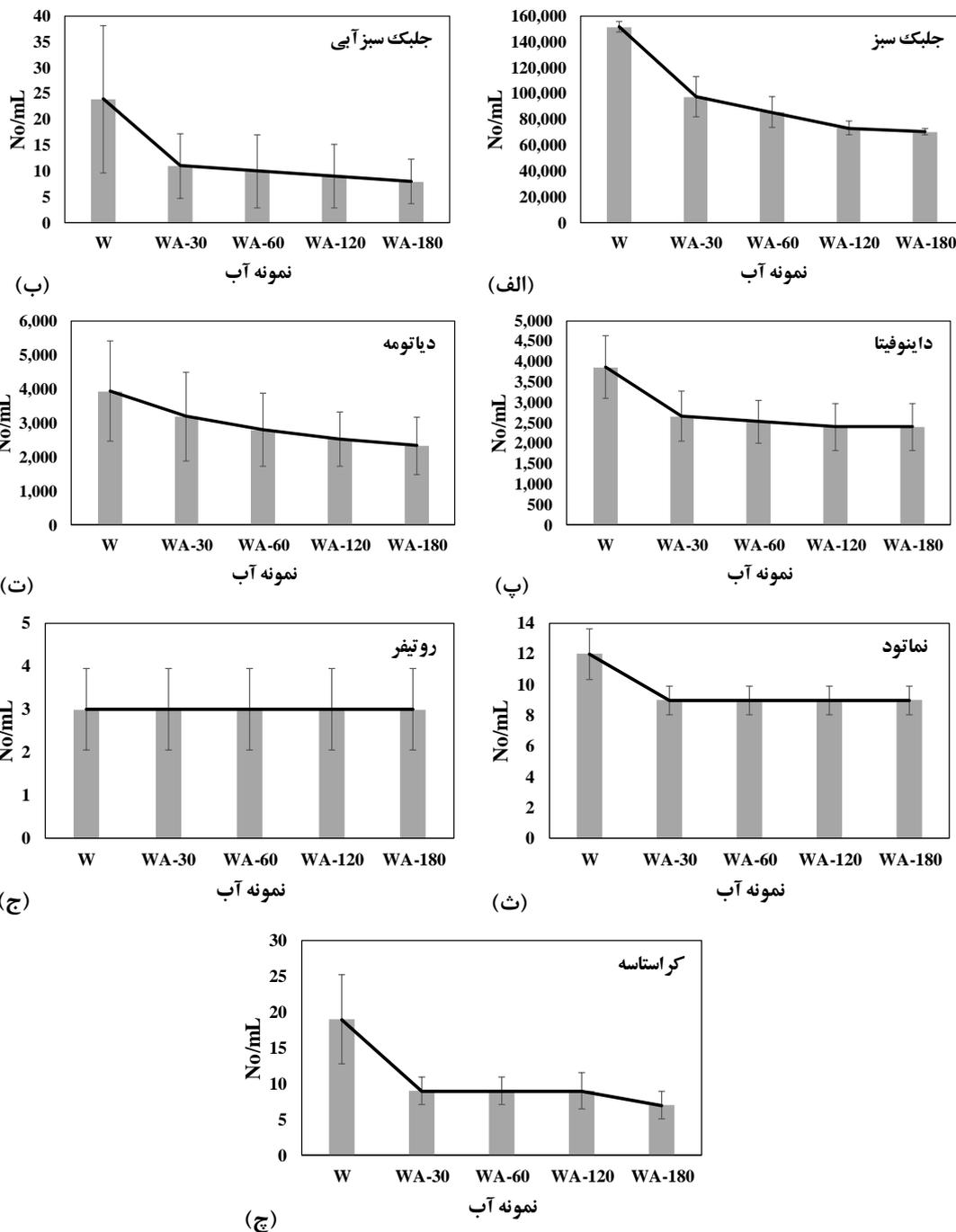
(الف)

شکل ۴-۱۱: تراکم سلولی ریزموجودات (الف) قبل از تزریق میناب ازن (ب) پس از تزریق میناب ازن

## ۴-۶-۱۱ اثر میکرو-نانو حباب‌های هوا بر تعداد ریزموجودات

بر اساس آزمون‌های انجام شده برای بررسی اثر تزریق میناب‌های هوا بر کاهش تعداد ریزموجودات آب خام، نمودار میانگین تعداد هر یک از ریزموجودات نظیر جلبک‌های سبز، جلبک‌های سبز-آبی، داینوفیتاها، دیاتومه‌ها، نماتودها، روتیفرها و کراستاسه‌ها در هر میلی‌لیتر (No/mL) در شکل ۴-۱۲

رسم شده است. در این نمودارها، W و WA به ترتیب معرف نمونه آب خام و نمونه آب دارای میناب هوا در زمان‌های مختلف پس از تزریق است.



شکل ۴-۱۲: نمودار میانگین تعداد ریزموجودات در هر میلی لیتر برای آب خام در مقایسه با آب دارای میناب هوا در زمان‌های ۳۰، ۶۰، ۱۲۰ و ۱۸۰ دقیقه (الف) جلبک سبز؛ (ب) جلبک سبز آبی؛ (پ) داینوفیتا؛ (ت) دیاتومه؛ (ث) نماتود؛ (ج) روتیفر و (چ) کراستاسه

شکل ۴-۱۲-الف نمودار میانگین تعداد جلبک‌های سبز در هر میلی‌لیتر برای آب خام را در مقایسه با آب دارای میناب هوا در زمان‌های ۳۰، ۶۰، ۱۲۰ و ۱۸۰ دقیقه نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، میانگین تعداد جلبک‌های سبز با گذشت زمان همواره کاهش یافته است؛ به طوری که تعداد آن‌ها از ۱۵۱۷۳۳ عدد در هر میلی‌لیتر در آب خام به ۷۰۴۰۰ عدد در هر میلی‌لیتر پس از ۱۸۰ دقیقه تزریق میناب هوا رسیده است که معادل با ۵۴ درصد کاهش است.

در شکل ۴-۱۲-ب، نمودار میانگین تعداد جلبک‌های سبز-آبی در هر میلی‌لیتر برای آب خام در مقایسه با آب دارای میناب هوا در زمان‌های ۳۰، ۶۰، ۱۲۰ و ۱۸۰ دقیقه نشان داده شده است. مطابق شکل ۴-۱۲-ب، با افزایش زمان تزریق میناب هوا، میانگین تعداد جلبک‌های سبز-آبی همواره کاهش یافته است و از ۲۴ عدد در هر میلی‌لیتر از آب خام، به هشت عدد در هر میلی‌لیتر پس از ۱۸۰ دقیقه تزریق میناب هوا رسیده است که معادل با ۶۶ درصد کاهش است. از جمله دلایل تغییرات گسترده انحراف معیار داده‌ها در شکل ۴-۱۲-ب، می‌توان به قابل کنترل نبودن مشخصات آب ورودی به حوضچه آزمایش در روزهای مختلف اشاره نمود.

شکل ۴-۱۲-پ نمودار میانگین تعداد داینوفیتاها در هر میلی‌لیتر را برای آب خام در مقایسه با آب دارای میناب هوا در زمان‌های ۳۰، ۶۰، ۱۲۰ و ۱۸۰ دقیقه نشان می‌دهد. مطابق شکل ۴-۱۲-پ، تنها تزریق ۳۰ دقیقه‌ای میناب هوا بر کاهش تعداد داینوفیتاها تأثیر قابل توجهی داشته و تعداد آن‌ها را از ۳۸۶۷ عدد در میلی‌لیتر به ۲۶۶۷ عدد در میلی‌لیتر کاهش داده است که معادل با ۳۱ درصد کاهش است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، پس از گذشت ۳۰ دقیقه، تعداد داینوفیتاها تقریباً ثابت باقی مانده است.

نمودار میانگین تعداد دیاتومه‌ها در هر میلی‌لیتر برای آب خام در مقایسه با آب دارای میناب هوا در زمان‌های ۳۰، ۶۰، ۱۲۰ و ۱۸۰ دقیقه در شکل ۴-۱۲-ت ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، افزایش زمان تزریق موجب کاهش پیوسته تعداد دیاتومه‌ها شده است. میانگین تعداد

دیاتومه‌ها در آب خام برابر با ۳۹۳۳ عدد در میلی‌لیتر بوده است که پس از تزریق ۱۸۰ دقیقه‌ای میناب هوا به ۲۳۳۳ عدد در میلی‌لیتر رسیده است که معادل با ۴۰ درصد کاهش است. تغییرات قابل توجه انحراف معیار داده‌ها در شکل ۴-۱۲-ت، می‌تواند ناشی از تفاوت کیفیت آب در روزهای مختلفی که آزمایش‌ها انجام شده‌اند، باشد.

در شکل ۴-۱۲-ث، نمودار میانگین تعداد نماتودها در هر میلی‌لیتر برای آب خام در مقایسه با آب دارای میناب هوا در زمان‌های ۳۰، ۶۰، ۱۲۰ و ۱۸۰ دقیقه نشان داده شده است. مطابق شکل ۴-۱۲-ث، تنها تزریق میناب هوا به مدت ۳۰ دقیقه بر کاهش تعداد نماتودها تأثیر داشته و تعداد آنها را از ۱۲ عدد در میلی‌لیتر به ۹ عدد در میلی‌لیتر کاهش داده که معادل با ۲۷ درصد کاهش است و پس از آن تعداد نماتودها ثابت باقی مانده است.

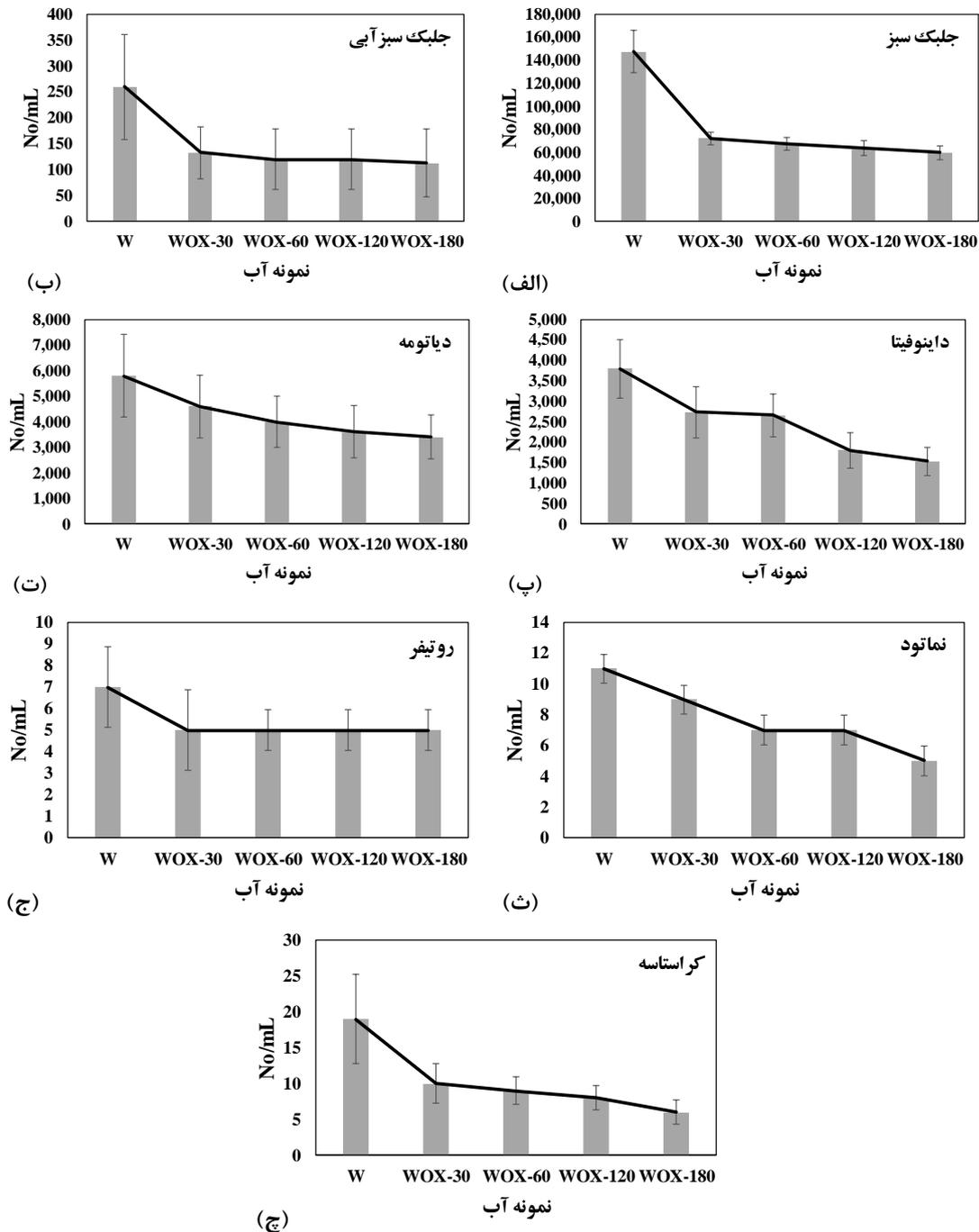
نمودار میانگین تعداد روتیفرها در هر میلی‌لیتر برای آب خام در مقایسه با آب دارای میناب هوا در زمان‌های ۳۰، ۶۰، ۱۲۰ و ۱۸۰ دقیقه در شکل ۴-۱۲-ج ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تزریق میناب هوا تأثیری بر کاهش تعداد روتیفرها، نداشته است.

شکل ۴-۱۲-چ، نمودار میانگین تعداد کراستاسه‌ها در هر میلی‌لیتر را برای آب خام در مقایسه با آب دارای میناب هوا در زمان‌های ۳۰، ۶۰، ۱۲۰ و ۱۸۰ دقیقه نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، میانگین تعداد کراستاسه‌ها با گذشت زمان کاهش یافته است؛ به طوری که تعداد آنها از ۱۹ عدد در هر میلی‌لیتر در آب خام به هفت عدد در هر میلی‌لیتر پس از تزریق ۱۸۰ دقیقه‌ای میناب هوا رسیده است که معادل با ۶۱ درصد کاهش است.

#### ۴-۶-۲ اثر میکرو-نانو حباب‌های اکسیژن بر تعداد ریزموجودات

بر اساس آزمون‌های انجام شده برای بررسی اثر تزریق میناب‌های اکسیژن بر کاهش تعداد ریزموجودات آب خام، نمودار میانگین تعداد هر یک از ریزموجودات نظیر جلبک‌های سبز، جلبک‌های سبز-آبی، داینوفیتاها، دیاتومه‌ها، نماتودها، روتیفرها و کراستاسه‌ها در هر میلی‌لیتر (No/mL) در

شکل ۴-۱۳ رسم شده است. در این نمودارها، W و WOX به ترتیب معرف نمونه آب خام و نمونه آب دارای میناب اکسیژن در زمان‌های مختلف پس از تزریق است.



شکل ۴-۱۳: نمودار میانگین تعداد ریزموجودات در هر میلی‌لیتر برای آب خام در مقایسه با آب دارای میناب اکسیژن در زمان‌های ۳۰، ۶۰، ۱۲۰ و ۱۸۰ دقیقه (الف) جلبک سبز؛ (ب) جلبک سبز آبی؛ (پ) داینوفیتا؛ (ت) دیاتومه؛ (ث) نماتود؛ (ج) روتیفر و (چ) کراستاسه

در شکل ۴-۱۳-الف، نمودار میانگین تعداد جلبک‌های سبز در هر میلی‌لیتر برای آب خام در مقایسه با آب دارای میناب اکسیژن در زمان‌های ۳۰، ۶۰، ۱۲۰ و ۱۸۰ دقیقه نشان داده شده است. مطابق شکل ۴-۱۳-الف، با افزایش زمان تزریق میناب اکسیژن، میانگین تعداد جلبک‌های سبز همواره کاهش یافته است و از ۱۴۷۷۳۳ عدد در هر میلی‌لیتر از آب خام، به ۵۹۹۳۳ عدد در هر میلی‌لیتر پس از ۱۸۰ دقیقه تزریق میناب اکسیژن رسیده است که معادل با ۵۹ درصد کاهش است.

نمودار میانگین تعداد جلبک‌های سبز-آبی در هر میلی‌لیتر برای آب خام در مقایسه با آب دارای میناب اکسیژن در زمان‌های ۳۰، ۶۰، ۱۲۰ و ۱۸۰ دقیقه در شکل ۴-۱۳-ب ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تنها تزریق ۳۰ دقیقه‌ای میناب اکسیژن بر کاهش تعداد جلبک‌های سبز-آبی تأثیر قابل توجهی داشته و تعداد آن‌ها را از ۲۶۰ عدد در میلی‌لیتر به ۱۳۳ عدد در میلی‌لیتر کاهش داده است و پس از آن، تعداد جلبک‌های سبز-آبی تقریباً ثابت باقی مانده است. تغییرات قابل توجه انحراف معیار داده‌ها در شکل ۴-۱۳-ب، می‌تواند ناشی از تفاوت کیفیت آب در روزهای مختلفی که آزمایش‌ها انجام شده‌اند، باشد.

در شکل ۴-۱۳-پ، نمودار میانگین تعداد داینوفیتاها در هر میلی‌لیتر برای آب خام در مقایسه با آب دارای میناب اکسیژن در زمان‌های ۳۰، ۶۰، ۱۲۰ و ۱۸۰ دقیقه نشان داده شده است. مطابق شکل ۴-۱۳-پ، با افزایش زمان تزریق میناب اکسیژن، میانگین تعداد داینوفیتاها همواره کاهش یافته است و از ۳۸۰۰ عدد در هر میلی‌لیتر از آب خام، به ۱۵۳۳ عدد در هر میلی‌لیتر پس از ۱۸۰ دقیقه تزریق میناب اکسیژن رسیده است که معادل با ۶۰ درصد کاهش است.

شکل ۴-۱۳-ت، نمودار میانگین تعداد دیاتومه‌ها در هر میلی‌لیتر را برای آب خام در مقایسه با آب دارای میناب اکسیژن در زمان‌های ۳۰، ۶۰، ۱۲۰ و ۱۸۰ دقیقه نشان می‌دهد. مطابق شکل ۴-۱۳-ت، افزایش زمان تزریق موجب کاهش پیوسته تعداد دیاتومه‌ها شده است. میانگین تعداد دیاتومه‌ها در آب خام برابر با ۵۸۰۰ عدد در میلی‌لیتر بوده است که پس از تزریق میناب اکسیژن به مدت ۱۸۰ دقیقه،

به ۳۴۰۰ عدد در میلی لیتر رسیده است که معادل با ۴۱ درصد کاهش است.

نمودار میانگین تعداد نماتودها در هر میلی لیتر برای آب خام در مقایسه با آب دارای میناب اکسیژن در زمان‌های ۳۰، ۶۰، ۱۲۰ و ۱۸۰ دقیقه در شکل ۴-۱۳-ث ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، افزایش زمان تزریق موجب کاهش تعداد نماتودها شده است. میانگین تعداد نماتودها در آب خام برابر با ۱۱ عدد در میلی لیتر بوده است که پس از تزریق ۱۸۰ دقیقه‌ای میناب اکسیژن، به پنج عدد در میلی لیتر رسیده است که معادل با ۵۴ درصد کاهش است.

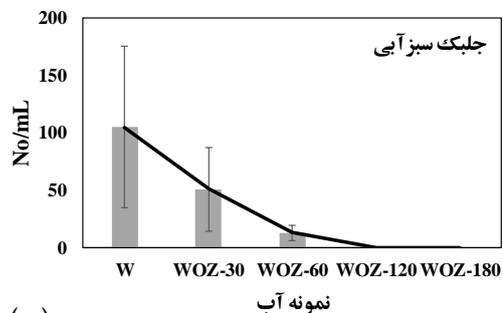
شکل ۴-۱۳-ج، نمودار میانگین تعداد روتیفرها در هر میلی لیتر را برای آب خام در مقایسه با آب دارای میناب اکسیژن در زمان‌های ۳۰، ۶۰، ۱۲۰ و ۱۸۰ دقیقه نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تنها تزریق میناب اکسیژن به مدت ۳۰ دقیقه، بر کاهش تعداد نماتودها تأثیر داشته و تعداد آنها را از ۷ عدد در میلی لیتر به ۵ عدد در میلی لیتر کاهش داده است؛ در حالی که پس از آن، تعداد نماتودها ثابت باقی مانده است.

در شکل ۴-۱۳-چ، نمودار میانگین تعداد کراستاسه‌ها در هر میلی لیتر برای آب خام در مقایسه با آب دارای میناب اکسیژن در زمان‌های ۳۰، ۶۰، ۱۲۰ و ۱۸۰ دقیقه نشان داده شده است. مطابق شکل ۴-۱۳-چ، میانگین تعداد کراستاسه‌ها با گذشت زمان کاهش یافته است؛ به طوری که تعداد آنها از ۱۹ عدد در هر میلی لیتر در آب خام به شش عدد در هر میلی لیتر پس از تزریق ۱۸۰ دقیقه‌ای میناب اکسیژن رسیده است که معادل با ۶۶ درصد کاهش است.

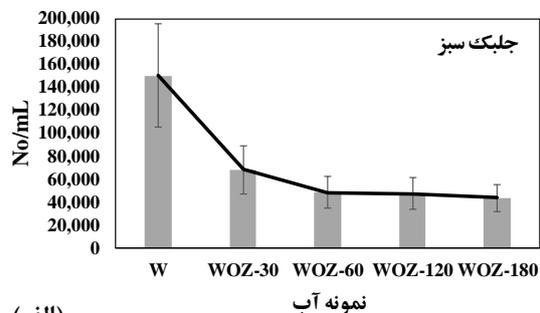
#### ۴-۶-۳ اثر میکرو-نانو حباب‌های ازن بر تعداد ریزموجودات

بر اساس آزمون‌های انجام شده برای بررسی اثر تزریق میناب‌های ازن بر کاهش تعداد ریزموجودات آب خام، نمودار میانگین تعداد هر یک از ریزموجودات نظیر جلبک‌های سبز، جلبک‌های سبز-آبی، داینوفیتاها، دیاتومه‌ها، نماتودها، روتیفرها و کراستاسه‌ها در هر میلی لیتر (No/mL) در شکل ۴-۱۴

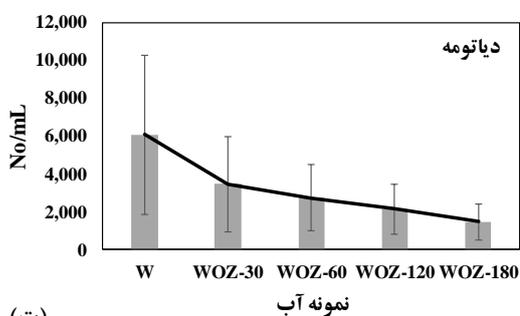
رسم شده است. در این نمودارها، W و WOZ به ترتیب معرف نمونه آب خام و نمونه آب دارای میناب ازن در زمان‌های مختلف پس از تزریق است.



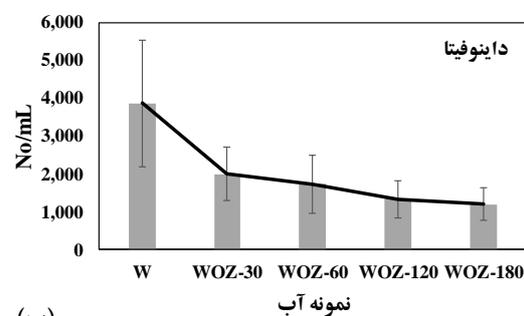
(ب)



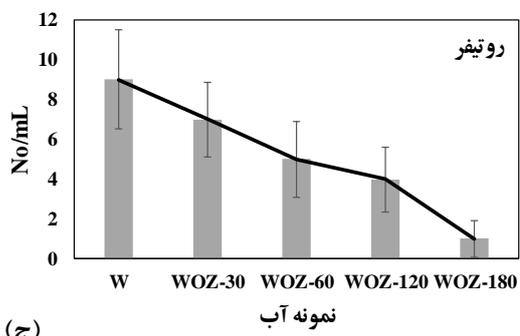
(الف)



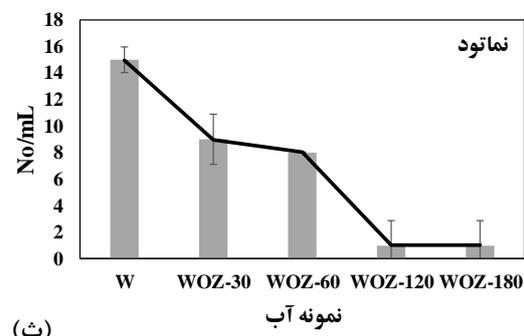
(ت)



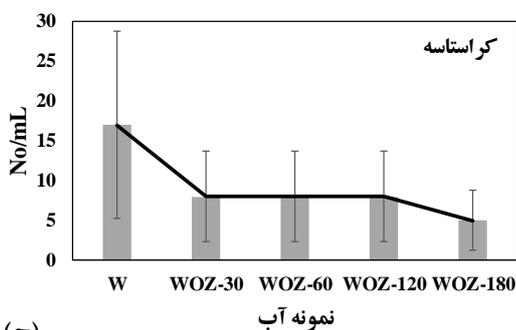
(پ)



(ج)



(ث)



(چ)

شکل ۴-۱۴: نمودار میانگین تعداد ریز موجودات در هر میلی لیتر برای آب خام در مقایسه با آب دارای میناب ازن در زمان‌های ۳۰، ۶۰، ۱۲۰ و ۱۸۰ دقیقه (الف) جلبک سبز؛ (ب) جلبک سبز آبی؛ (پ) داینوفیتا؛ (ت) دیاتومه؛ (ث) نماتود؛ (ج) روتیفر و (چ) کراستاسه

نمودار میانگین تعداد جلبک‌های سبز در هر میلی‌لیتر برای آب خام در مقایسه با آب دارای میناب ازن در زمان‌های ۳۰، ۶۰، ۱۲۰ و ۱۸۰ دقیقه در شکل ۴-۱۴-الف ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، میانگین تعداد جلبک‌های سبز با گذشت زمان همواره کاهش یافته است؛ به طوری که تعداد آن‌ها از ۱۵۰۱۳۳ عدد در هر میلی‌لیتر در آب خام به ۴۳۵۳۳ عدد در هر میلی‌لیتر پس از تزریق ۱۸۰ دقیقه‌ای میناب ازن رسیده است که معادل با ۷۱ درصد کاهش است.

شکل ۴-۱۴-ب، نمودار میانگین تعداد جلبک‌های سبز-آبی در هر میلی‌لیتر را برای آب خام در مقایسه با آب دارای میناب ازن در زمان‌های ۳۰، ۶۰، ۱۲۰ و ۱۸۰ دقیقه نشان می‌دهد. مطابق شکل ۴-۱۴-ب، افزایش زمان تزریق موجب کاهش قابل توجه در تعداد جلبک‌های سبز-آبی شده است. میانگین تعداد جلبک‌های سبز-آبی در آب خام برابر با ۱۰۵ عدد در میلی‌لیتر بوده است که در مدت ۱۸۰ دقیقه‌ای تزریق میناب ازن، به صفر رسیده است. از جمله دلایل تغییرات گسترده انحراف معیار داده‌ها در شکل ۴-۱۴-ب، می‌توان به قابل کنترل نبودن مشخصات آب ورودی به حوضچه آزمایش در روزهای مختلف اشاره نمود.

نمودار میانگین تعداد داینوفیتاها در هر میلی‌لیتر برای آب خام در مقایسه با آب دارای میناب ازن در زمان‌های ۳۰، ۶۰، ۱۲۰ و ۱۸۰ دقیقه در شکل ۴-۱۴-پ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش زمان تزریق میناب ازن، میانگین تعداد داینوفیتاها همواره کاهش یافته است و از ۳۸۶۷ عدد در هر میلی‌لیتر از آب خام، به ۱۲۰۰ عدد در هر میلی‌لیتر در مدت ۱۸۰ دقیقه تزریق میناب ازن رسیده است که معادل با ۶۸ درصد کاهش است. از جمله دلایل تغییرات گسترده انحراف معیار داده‌ها در شکل ۴-۱۴-پ، می‌توان به قابل کنترل نبودن مشخصات آب ورودی به حوضچه آزمایش در روزهای مختلف اشاره نمود.

در شکل ۴-۱۴-ت، نمودار میانگین تعداد دیاتومه‌ها در هر میلی‌لیتر برای آب خام در مقایسه با آب دارای میناب ازن در زمان‌های ۳۰، ۶۰، ۱۲۰ و ۱۸۰ دقیقه نشان داده شده است. همان‌طور که

مشاهده می‌شود، افزایش زمان تزریق موجب کاهش پیوسته تعداد دیاتومه‌ها شده است. میانگین تعداد دیاتومه‌ها در آب خام برابر با ۶۰۶۷ عدد در میلی‌لیتر بوده است که پس از تزریق ۱۸۰ دقیقه‌ای میناب ازن، به ۱۴۶۷ عدد در میلی‌لیتر رسیده است که معادل با ۷۵ درصد کاهش است. تغییرات قابل توجه انحراف معیار داده‌ها در شکل ۴-۱۴-ت، می‌تواند ناشی از تفاوت کیفیت آب در روزهای مختلفی که آزمایش‌ها انجام شده‌اند، باشد.

شکل ۴-۱۴-ث، نمودار میانگین تعداد نماتودها در هر میلی‌لیتر را برای آب خام در مقایسه با آب دارای میناب ازن در زمان‌های ۳۰، ۶۰، ۱۲۰ و ۱۸۰ دقیقه نشان می‌دهد. مطابق شکل ۴-۱۴-ث، افزایش زمان تزریق موجب کاهش تعداد نماتودها شده است. میانگین تعداد نماتودها در آب خام برابر با ۱۵ عدد در میلی‌لیتر بوده است که پس از تزریق ۱۸۰ دقیقه‌ای میناب ازن به یک عدد در میلی‌لیتر رسیده است که معادل با ۹۱ درصد کاهش است.

در شکل ۴-۱۴-ج، نمودار میانگین تعداد روتیفرها در هر میلی‌لیتر برای آب خام در مقایسه با آب دارای میناب ازن در زمان‌های ۳۰، ۶۰، ۱۲۰ و ۱۸۰ دقیقه نشان داده شده است. مطابق شکل ۴-۱۴-ج، با افزایش زمان تزریق میناب ازن، میانگین تعداد روتیفرها کاهش یافته است و از ۹ عدد در هر میلی‌لیتر از آب خام، به یک عدد در هر میلی‌لیتر پس از ۱۸۰ دقیقه تزریق میناب ازن رسیده است که معادل با ۸۸ درصد کاهش است.

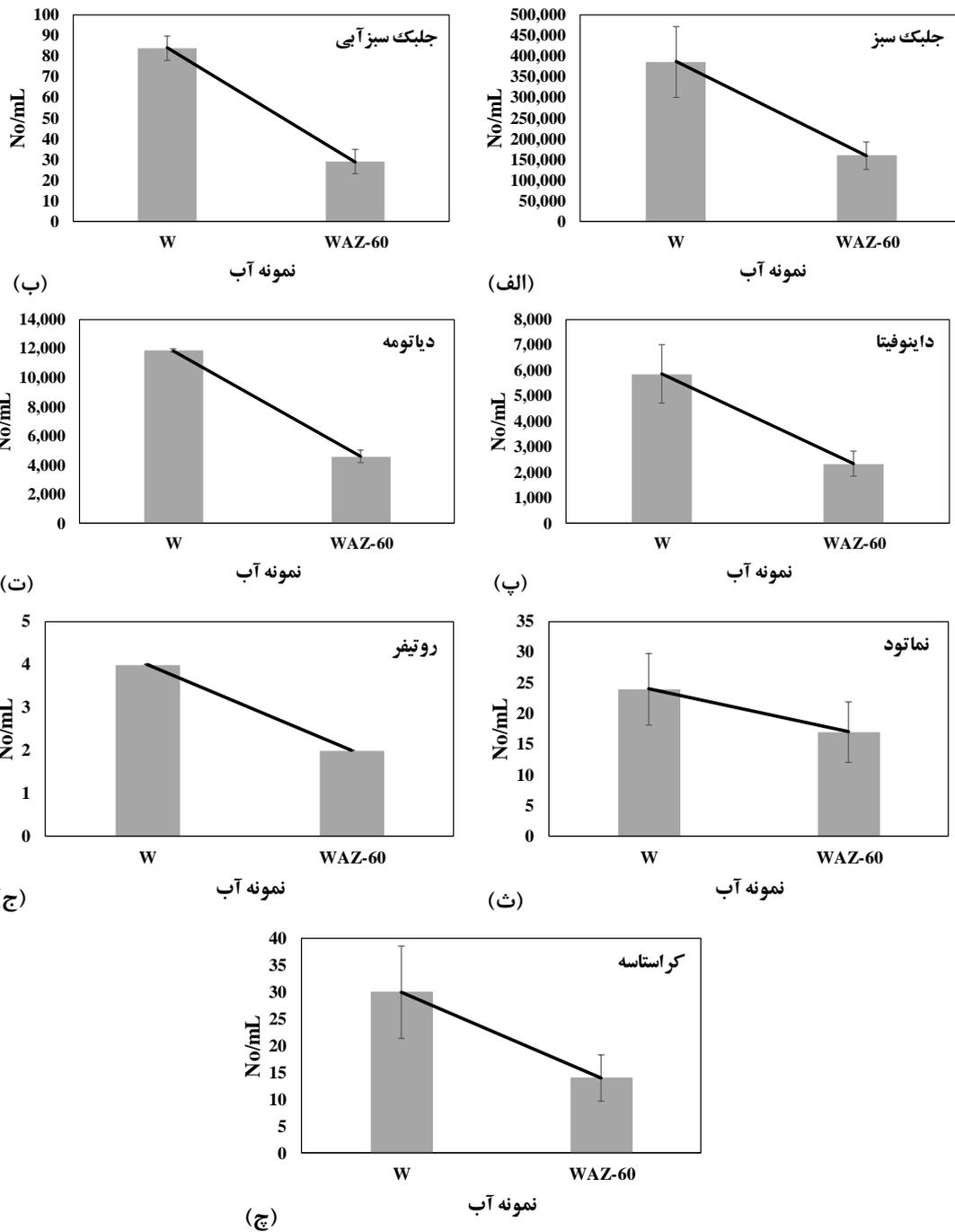
نمودار میانگین تعداد کراستاسه‌ها در هر میلی‌لیتر برای آب خام در مقایسه با آب دارای میناب ازن در زمان‌های ۳۰، ۶۰، ۱۲۰ و ۱۸۰ دقیقه در شکل ۴-۱۴-چ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش زمان تزریق میناب ازن، میانگین تعداد کراستاسه‌ها کاهش یافته است و از ۱۷ عدد در هر میلی‌لیتر از آب خام، به پنج عدد در هر میلی‌لیتر پس از ۱۸۰ دقیقه تزریق میناب ازن رسیده است که معادل با ۷۵ درصد کاهش است. تغییرات قابل توجه انحراف معیار داده‌ها در شکل ۴-۱۴-چ، می‌تواند ناشی از تفاوت کیفیت آب در روزهای مختلفی که آزمایش‌ها انجام شده‌اند، باشد.

## ۴-۶-۴ اثر ترکیب میکرو-نانو حباب‌های هوا و ازن بر تعداد ریزموجودات

در نتایج ارائه شده در بخش‌های قبل مشاهده شد که بیشترین نرخ کاهش در تعداد ریزموجودات در مدت ۳۰ دقیقه‌ای تزریق گاز مورد نظر رخ داده است. به همین منظور و برای بررسی اثر ترکیبی میکرو-نانو حباب‌های هوا و ازن بر کاهش تعداد ریزموجودات در آب خام، میناب هوا به مدت ۳۰ دقیقه و پس از آن میناب ازن نیز به مدت ۳۰ دقیقه (در مجموع ۶۰ دقیقه) به آب ورودی تزریق شد. مشابه حالت‌های قبل در این بخش نیز، نمودار میانگین تعداد هر یک از ریزموجودات نظیر جلبک‌های سبز، جلبک‌های سبز-آبی، داینوفیتاها، دیاتومه‌ها، نماتودها، روتیفرها و کراستاسه‌ها در هر میلی‌لیتر (No/mL) تحت تأثیر ترکیب میکرو-نانو حباب‌های هوا و ازن در پایان زمان تزریق (۶۰ دقیقه) در شکل ۴-۱۵ مورد بررسی قرار گرفته است. در این نمودارها، W و WAZ به ترتیب معرف نمونه آب خام و نمونه آب دارای میناب هوا و ازن است.

شکل ۴-۱۵-الف، نمودار میانگین تعداد جلبک‌های سبز در هر میلی‌لیتر را برای آب خام در مقایسه با آب دارای میناب هوا و ازن در زمان ۶۰ دقیقه نشان می‌دهد. مطابق شکل ۴-۱۵-الف، میانگین تعداد جلبک‌های سبز پس از ۶۰ دقیقه کاهش یافته است؛ به طوری که تعداد آن‌ها از ۳۸۶۴۰۰ عدد در هر میلی‌لیتر در آب خام به ۱۵۹۵۳۳ عدد در هر میلی‌لیتر پس از تزریق ۶۰ دقیقه‌ای ترکیب میناب هوا و ازن رسیده است که معادل با ۵۹ درصد کاهش است.

در شکل ۴-۱۵-ب، نمودار میانگین تعداد جلبک‌های سبز-آبی در هر میلی‌لیتر برای آب خام در مقایسه با آب دارای میناب هوا و ازن در زمان ۶۰ دقیقه نشان داده شده است. مطابق شکل ۴-۱۵-ب، میانگین تعداد جلبک‌های سبز-آبی از ۸۴ عدد در هر میلی‌لیتر در آب خام به ۲۹ عدد در هر میلی‌لیتر پس از ۶۰ دقیقه تزریق ترکیب میناب هوا و ازن، رسیده است که معادل با ۶۵ درصد کاهش است.



شکل ۴-۱۵: نمودار میانگین تعداد ریزموجودات در هر میلی لیتر برای آب خام در مقایسه با آب دارای میناب هوا و ازن در زمان ۶۰ دقیقه (الف) جلبک سبز؛ (ب) جلبک سبز آبی؛ (پ) داینوفیتا؛ (ت) دیاتومه؛ (ث) نماتود؛ (ج) روتیفر و (چ) کراستاسه

نمودار میانگین تعداد داینوفیتاها در هر میلی لیتر را برای آب خام در مقایسه با آب دارای میناب هوا و ازن در زمان ۶۰ دقیقه در شکل ۴-۱۵-پ ارائه شده است. همان طور که مشاهده می شود،

میانگین تعداد داینوفیتها در آب خام برابر با ۵۸۶۷ عدد در میلی‌لیتر بوده است که پس از تزریق ۶۰ دقیقه‌ای ترکیب میناب هوا و ازن، به ۲۳۳۳ عدد در میلی‌لیتر رسیده است که معادل با ۶۰ درصد کاهش است.

شکل ۴-۱۵-ت، میانگین تعداد دیاتومه‌ها در هر میلی‌لیتر را برای آب خام در مقایسه با آب دارای میناب هوا و ازن در زمان ۶۰ دقیقه نشان می‌دهد. مطابق شکل ۴-۱۵-ت، میانگین تعداد دیاتومه‌ها پس از ۶۰ دقیقه کاهش یافته است؛ به طوری که تعداد آن‌ها از ۱۱۸۶۷ عدد در هر میلی‌لیتر در آب خام به ۴۶۰۰ عدد در هر میلی‌لیتر، پس از ۶۰ دقیقه تزریق ترکیب میناب هوا و ازن رسیده است که معادل با ۶۱ درصد کاهش است.

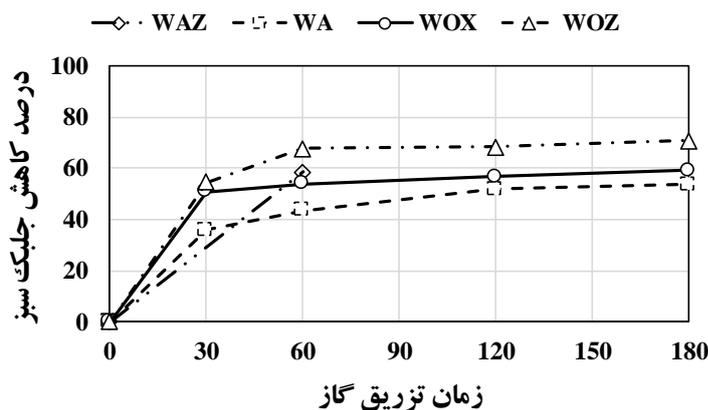
در شکل ۴-۱۵-ث، نمودار میانگین تعداد نماتودها در هر میلی‌لیتر برای آب خام در مقایسه با آب دارای میناب هوا و ازن در زمان ۶۰ دقیقه نشان داده شده است. مطابق شکل ۴-۱۵-ث، میانگین تعداد نماتودها در آب خام برابر با ۲۴ عدد در میلی‌لیتر بوده است که پس از تزریق ۶۰ دقیقه‌ای ترکیب میناب هوا و ازن، به ۱۷ عدد در میلی‌لیتر رسیده است که معادل با ۳۱ درصد کاهش است.

نمودار میانگین تعداد روتیفرها در هر میلی‌لیتر برای آب خام در مقایسه با آب دارای میناب هوا و ازن در زمان ۶۰ دقیقه در شکل ۴-۱۵-ج ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، میانگین تعداد روتیفرها در آب خام برابر با چهار عدد در میلی‌لیتر بوده است که پس از ۶۰ دقیقه تزریق ترکیب میناب هوا و ازن، به دو عدد در میلی‌لیتر رسیده است که معادل با ۵۰ درصد کاهش است.

شکل ۴-۱۵-چ، نمودار میانگین تعداد کراستاسه‌ها در هر میلی‌لیتر را برای آب خام در مقایسه با آب دارای میناب هوا و ازن در زمان ۶۰ دقیقه نشان می‌دهد. مطابق شکل ۴-۱۵-چ، میانگین تعداد کراستاسه‌ها پس از ۶۰ دقیقه کاهش یافته است؛ به طوری که تعداد آن‌ها از ۳۰ عدد در هر میلی‌لیتر در آب خام به ۱۴ عدد در هر میلی‌لیتر پس از تزریق ۶۰ دقیقه‌ای ترکیب میناب هوا و ازن رسیده است که معادل با ۵۳ درصد کاهش است.

## ۴-۶-۵ مقایسه تأثیر تزریق گازهای مختلف به آب خام در کاهش تعداد جلبک‌های سبز

در شکل ۴-۱۶ تأثیر تزریق گازهای هوا، اکسیژن، ازن و ترکیب هوا و ازن به آب خام، در کاهش تعداد جلبک‌های سبز در زمان‌های مختلف، ارائه شده است. پس از تزریق میناب هوا به آب خام، تعداد جلبک‌های سبز در مدت زمان ۳۰ تا ۱۸۰ دقیقه، به ترتیب از ۳۵/۸۰ تا ۵۳/۵۹ درصد کاهش یافته است. همچنین تزریق میناب اکسیژن به آب خام، موجب کاهش ۵۰/۸۳ تا ۵۹/۲۰ درصدی تعداد جلبک‌های سبز در مدت زمان ۳۰ تا ۱۸۰ دقیقه شده است. تزریق میناب ازن به آب خام در مدت زمان ۳۰ تا ۱۸۰ دقیقه، تعداد جلبک‌های سبز را از ۵۴/۵۲ تا ۷۰/۷۴ درصد، کاهش داده است. تزریق ترکیب میناب هوا و ازن در مدت زمان ۶۰ دقیقه، موجب کاهش ۵۸/۵۷ درصدی تعداد جلبک‌های سبز شده است. به این ترتیب مشاهده می‌شود که در مدت زمان ۶۰ دقیقه، میناب ازن بالاترین بازدهی را در کاهش تعداد جلبک‌های سبز داشته است و در مدت زمان ۳۰ تا ۱۸۰ دقیقه، میناب ازن بالاترین و میناب هوا کم‌ترین بازدهی را در کاهش تعداد جلبک‌های سبز داشته است. دلیل بازدهی بالاتر میناب ازن در کاهش تعداد جلبک‌های سبز را می‌توان ناشی از تولید بیش‌ترین رادیکال‌های هیدروکسیل دانست [۵۳]. علاوه بر این مشاهده می‌شود که پس از گذشت ۶۰ دقیقه از آغاز تزریق، نرخ حذف جلبک‌های سبز به وسیله‌ی میناب‌های ازن، تقریباً ثابت شده است. برای مقایسه نتایج به دست آمده با نتایج سایر پژوهش‌های انجام شده می‌توان به مطالعه ختائی و همکاران [۶۳] اشاره نمود که حذف هم‌زمان دو گونه از جلبک‌های سبز با استفاده از فرآیند ازن‌زنی را مورد بررسی قرار دادند. در پژوهش آن‌ها، نرخ ورودی گاز ازن به میزان سه لیتر بر ساعت و در مدت زمان ۲۰ دقیقه، گونه‌های *Oocystis sp.* و *Cosmarium sp.* به ترتیب به میزان ۸۵/۱۸ و ۵۸ درصد کاهش یافته‌اند. به این ترتیب، نتایج این بخش از مطالعه با پژوهش اشاره شده، مطابقت دارد.

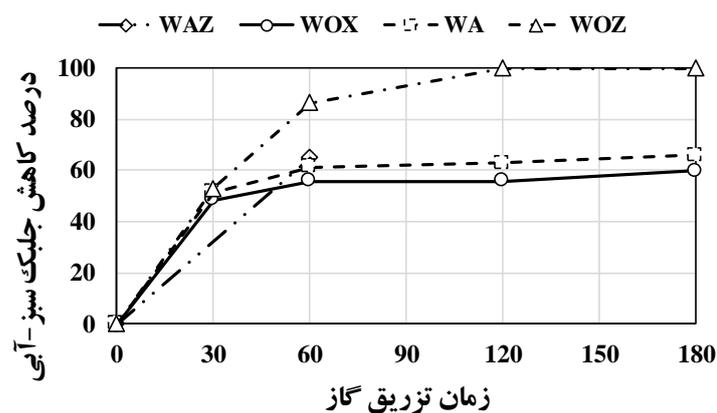


شکل ۴-۱۶: نمودار مقایسه درصد کاهش تعداد جلبک‌های سبز با زمان برای آب دارای میناب هوا (WA)، اکسیژن (WOX)، ازن (WOZ) و ترکیب هوا و ازن (WAZ) نسبت به آب خام

#### ۴-۶-۶ مقایسه تأثیر تزریق گازهای مختلف به آب خام در کاهش تعداد جلبک‌های سبز-آبی

شکل ۴-۱۷ تأثیر تزریق گازهای هوا، اکسیژن، ازن و ترکیب هوا و ازن به آب خام، در کاهش تعداد جلبک‌های سبز-آبی در زمان‌های مختلف را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، پس از تزریق میناب اکسیژن به آب خام، تعداد جلبک‌های سبز-آبی در مدت زمان ۳۰ تا ۱۸۰ دقیقه، به ترتیب از ۴۸/۴۸ تا ۵۹/۸۵ درصد کاهش یافته است. همچنین تزریق میناب هوا به آب خام، موجب کاهش ۵۱/۵۲ تا ۶۵/۷۸ درصدی تعداد جلبک‌های سبز-آبی در مدت زمان ۳۰ تا ۱۸۰ دقیقه شده است. تزریق میناب ازن به آب خام در مدت زمان ۳۰ تا ۱۸۰ دقیقه، تعداد جلبک‌های سبز-آبی را از ۵۲/۸۸ تا ۱۰۰ درصد، کاهش داده است. تزریق ترکیب میناب هوا و ازن در مدت زمان ۶۰ دقیقه، موجب کاهش ۶۵/۰۹ درصدی تعداد جلبک‌های سبز-آبی شده است. به این ترتیب مشاهده می‌شود که در مدت زمان ۶۰ دقیقه، میناب ازن بالاترین بازدهی را در کاهش تعداد جلبک‌های سبز-آبی داشته است و در مدت زمان ۳۰ تا ۱۸۰ دقیقه، میناب ازن بالاترین و میناب اکسیژن کم‌ترین بازدهی را در کاهش تعداد جلبک‌های سبز-آبی داشته است. نتایج نشان داده است که میناب‌های هوا نیز رادیکال‌های هیدروکسیل تولید می‌کنند و می‌توانند در گندزدایی مؤثر باشند [۱۷]. عملکرد قابل

توجه میناب هوا در کاهش تعداد جلبک‌های سبز-آبی، می‌تواند از نظر اقتصادی به صرفه باشد. در پژوهش‌های گذشته از جمله در مطالعه بوی و هان<sup>۱</sup> [۶۴]، نیز به حذف جلبک سبز-آبی *Phormidium* با استفاده از شناورسازی به وسیله حباب پرداخته شده است. آن‌ها نشان دادند که تزریق ۳۰ درصدی حباب هوا، منجر به حذف ۶۰ درصدی تعداد سلول‌های *Phormidium* شده است که با نتایج به دست آمده از پژوهش حاضر، همخوانی دارد. در پژوهش دیگری، سوانویتایا و سینگهافن<sup>۲</sup> [۶۵] نیز به بررسی ازن بر کنترل جلبک‌های سبز-آبی پرداخته‌اند. نتایج آن‌ها حاکی از آن بود که در مدت زمان ۴۰ دقیقه و غلظت ازن ۱۱۲ میلی‌گرم بر لیتر، ۷۲ درصد جلبک‌های سبز-آبی حذف شده‌اند؛ در حالی که در پژوهش حاضر با مصرف گاز کمتر، بازدهی حذف جلبک‌های سبز-آبی، بیشتر بوده است.



شکل ۴-۱۷: نمودار مقایسه درصد کاهش تعداد جلبک‌های سبز-آبی با زمان برای آب دارای میناب هوا (WA)، اکسیژن (WOX)، ازن (WOZ) و ترکیب هوا و ازن (WAZ) نسبت به آب خام

<sup>۱</sup>Bui and Han

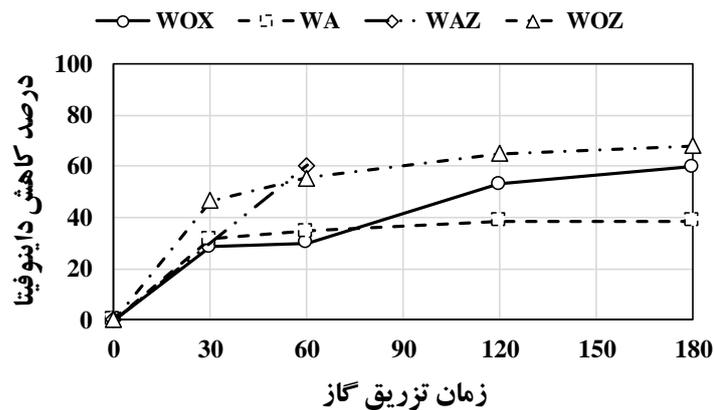
<sup>۲</sup>Suwanvitaya and Singhaphen

## ۴-۶-۷ مقایسه تأثیر تزریق گازهای مختلف به آب خام در کاهش تعداد داینوفیتاها

در شکل ۴-۱۸ تأثیر تزریق گازهای هوا، اکسیژن، ازن و ترکیب هوا و ازن به آب خام، در کاهش تعداد داینوفیتاها در زمان‌های مختلف، ارائه شده است. پس از تزریق میناب هوا به آب خام، تعداد داینوفیتاها در مدت زمان ۳۰ تا ۱۸۰ دقیقه، به ترتیب از ۳۱/۴۴ تا ۳۸/۴۴ درصد کاهش یافته است. همچنین تزریق میناب اکسیژن به آب خام، موجب کاهش ۲۸/۵۵ تا ۵۹/۷۶ درصدی تعداد داینوفیتاها در مدت زمان ۳۰ تا ۱۸۰ دقیقه شده است. تزریق میناب ازن به آب خام در مدت زمان ۳۰ تا ۱۸۰ دقیقه، تعداد داینوفیتاها را از ۴۶/۶۵ تا ۶۸/۱۰ درصد، کاهش داده است. تزریق ترکیب میناب هوا و ازن در مدت زمان ۶۰ دقیقه، موجب کاهش ۶۰/۲۵ درصدی تعداد داینوفیتاها شده است. به این ترتیب مشاهده می‌شود که در مدت زمان ۶۰ دقیقه، ترکیب میناب هوا و ازن بالاترین بازدهی را در کاهش تعداد داینوفیتاها داشته است و در مدت زمان ۳۰ تا ۱۸۰ دقیقه، میناب ازن بالاترین و میناب هوا کم‌ترین بازدهی را در کاهش تعداد داینوفیتاها داشته است. در پژوهش‌های گذشته، ایورتس و همکاران<sup>۱</sup> [۶۶] برای حذف گونه *Ceratium hirundinella* از داینوفیتاها در آب خام از منعقد کننده‌های  $\text{Ca(OH)}_2$  و  $\text{SiO}_2$  به ترتیب به مقدار ۱۳۵ و چهار میلی‌گرم بر لیتر استفاده کردند که منجر به حذف ۷۵ درصدی این گونه از داینوفیتاها شده است. در حالی که در مطالعه حاضر، بدون استفاده از هر گونه ماده منعقد کننده‌ای، مشاهده شد که میناب ازن بازدهی قابل توجهی در حذف داینوفیتاها دارد.

---

<sup>۱</sup>Ewerts et al.

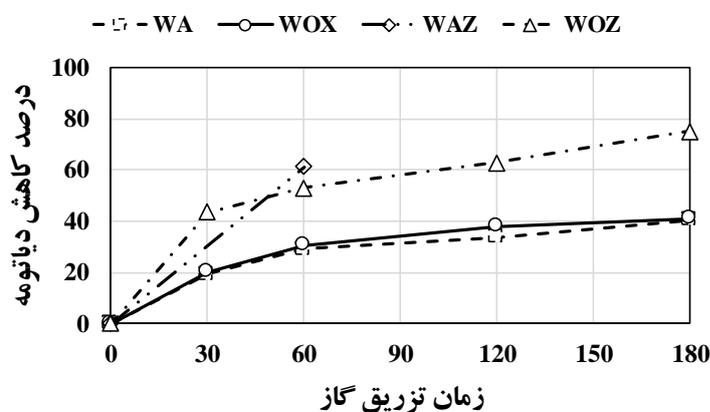


شکل ۴-۱۸: نمودار مقایسه درصد کاهش تعداد داینوفیتاها با زمان برای آب دارای میناب هوا (WA)، اکسیژن (WOX)، ازن (WOZ) و ترکیب هوا و ازن (WAZ) نسبت به آب خام

#### ۴-۶-۸ مقایسه تأثیر تزریق گازهای مختلف به آب خام در کاهش تعداد دیاتومه‌ها

تأثیر تزریق گازهای هوا، اکسیژن، ازن و ترکیب هوا و ازن به آب خام، در کاهش تعداد دیاتومه‌ها در زمان‌های مختلف، در شکل ۴-۱۹ مورد بررسی قرار گرفته است. تزریق میناب هوا به آب خام، موجب کاهش ۱۹/۳۷ تا ۴۰/۳۲ درصدی تعداد دیاتومه‌ها در مدت زمان ۳۰ تا ۱۸۰ دقیقه شده است. همچنین پس از تزریق میناب اکسیژن به آب خام، تعداد دیاتومه‌ها در مدت زمان ۳۰ تا ۱۸۰ دقیقه، به ترتیب از ۲۰/۲۰ تا ۴۰/۹۲ درصد کاهش یافته است. تزریق میناب ازن به آب خام در مدت زمان ۳۰ تا ۱۸۰ دقیقه، تعداد دیاتومه‌ها را از ۴۳/۵۷ تا ۷۵/۱۲ درصد، کاهش داده است. تزریق ترکیب میناب هوا و ازن در مدت زمان ۶۰ دقیقه، موجب کاهش ۶۱/۲۶ درصدی تعداد دیاتومه‌ها شده است. به این ترتیب مشاهده می‌شود که در مدت زمان ۶۰ دقیقه، ترکیب میناب هوا و ازن بالاترین بازدهی را در کاهش تعداد دیاتومه‌ها داشته است و در مدت زمان ۳۰ تا ۱۸۰ دقیقه، میناب ازن بالاترین و میناب هوا کم‌ترین بازدهی را در کاهش تعداد دیاتومه‌ها داشته است. در پژوهشی برای حذف دو گونه

از دیاتومه‌ها در آب، لی و همکاران<sup>۱</sup> [۶۷] از ازن و مواد منعقد کننده استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که استفاده از ۹/۱ میلی‌گرم بر لیتر پلی آلومینیوم کلرید، یک میلی‌گرم بر لیتر پلی آمین و دو میلی‌گرم بر لیتر ازن، منجر به حذف تقریباً ۸۸ و ۱۰۰ درصدی دو گونه *Synedra acus* و *Stephanodiscus sp.* شده است. در حالی که در پژوهش حاضر بدون استفاده از هر گونه ماده‌ی منعقدکننده و مصرف گاز ازن کمتر، نتایج قابل قبولی برای حذف تمام گونه‌های دیاتومه‌ها ارائه شده است.



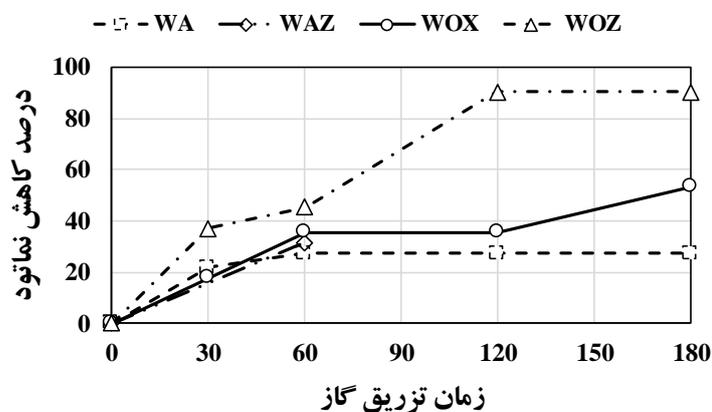
شکل ۴-۱۹: نمودار مقایسه درصد کاهش تعداد دیاتومه‌ها با زمان برای آب دارای میناب هوا (WA)، اکسیژن (WOX)، ازن (WOZ) و ترکیب هوا و ازن (WAZ) نسبت به آب خام

#### ۴-۶-۹ مقایسه تأثیر تزریق گازهای مختلف به آب خام در کاهش تعداد نماتودها

شکل ۴-۲۰ تأثیر تزریق گازهای هوا، اکسیژن، ازن و ترکیب هوا و ازن به آب خام، در کاهش تعداد نماتودها در زمان‌های مختلف را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، پس از تزریق میناب هوا به آب خام، تعداد نماتودها در مدت زمان ۳۰ تا ۱۸۰ دقیقه، به ترتیب از ۲۱/۷۵ تا ۲۷/۳۰ درصد کاهش یافته است و پس از ۶۰ دقیقه، نرخ کاهش نماتودها ثابت باقی مانده است. همچنین تزریق

<sup>۱</sup>Lee et al.

میناب اکسیژن به آب خام، موجب کاهش ۱۷/۷۸ تا ۵۳/۳۳ درصدی تعداد نماتودها در مدت زمان ۳۰ تا ۱۸۰ دقیقه شده است. تزریق میناب ازن به آب خام در مدت زمان ۳۰ تا ۱۸۰ دقیقه، تعداد نماتودها را از ۳۶/۹۰ تا ۹۰/۴۸ درصد، کاهش داده است. تزریق ترکیب میناب هوا و ازن در مدت زمان ۶۰ دقیقه، موجب کاهش ۳۱/۶۵ درصدی تعداد نماتودها شده است. به این ترتیب مشاهده می‌شود که در مدت زمان ۶۰ دقیقه، میناب ازن بالاترین بازدهی را در کاهش تعداد نماتودها داشته است و در مدت زمان ۳۰ تا ۱۸۰ دقیقه، میناب ازن بالاترین و میناب هوا کم‌ترین بازدهی را در کاهش تعداد نماتودها داشته است. در پژوهش‌های گذشته مانند مطالعه کاس و همکاران<sup>۱</sup> [۶۸] نیز به بررسی حذف نماتودها در آب با استفاده از ازن پرداخته شده است. آن‌ها نتیجه گرفتند که در حضور دو میلی‌گرم بر لیتر ازن و در مدت زمان ۶۰ دقیقه، میزان حذف تعداد نماتودها برابر با ۴۲ درصد بوده است؛ در حالی که در پژوهش حاضر با مقدار گاز مصرفی کمتر، بازدهی حذف نماتودها بیشتر بوده است.



شکل ۴-۲۰: نمودار مقایسه درصد کاهش تعداد نماتودها با زمان برای آب دارای میناب هوا (WA)، اکسیژن (WOX)، ازن (WOZ) و ترکیب هوا و ازن (WAZ) نسبت به آب خام

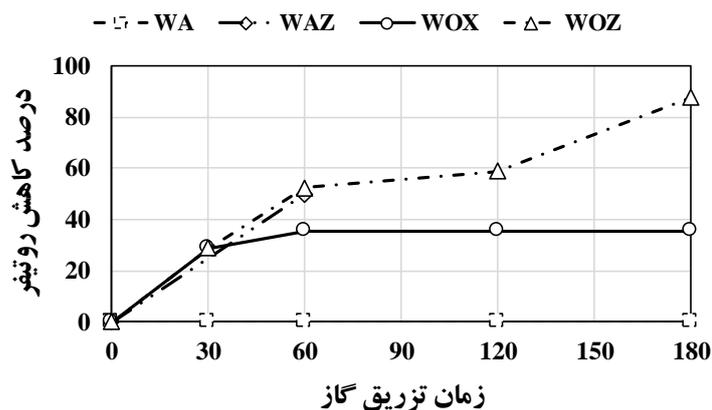
<sup>۱</sup>Kos et al.

## ۴-۶-۱۰ مقایسه تأثیر تزریق گازهای مختلف به آب خام در کاهش تعداد روتیفرها

تأثیر تزریق گازهای هوا، اکسیژن، ازن و ترکیب هوا و ازن به آب خام، در کاهش تعداد روتیفرها در زمان‌های مختلف، در شکل ۴-۲۱ مورد بررسی قرار گرفته است. تزریق میناب هوا به آب خام در مدت زمان ۳۰ تا ۱۸۰ دقیقه تأثیری در کاهش تعداد روتیفرها نداشته است. همچنین پس از تزریق میناب اکسیژن به آب خام، تعداد روتیفرها در مدت زمان ۳۰ تا ۱۸۰ دقیقه، به ترتیب از ۲۸/۸۹ تا ۳۵/۵۶ درصد کاهش یافته است و پس از ۶۰ دقیقه، نرخ کاهش تعداد روتیفرها ثابت باقی مانده است. تزریق میناب ازن به آب خام در مدت زمان ۳۰ تا ۱۸۰ دقیقه، تعداد روتیفرها را از ۲۸/۸۹ تا ۸۷/۷۸ درصد، کاهش داده است. تزریق ترکیب میناب هوا و ازن در مدت زمان ۶۰ دقیقه، موجب کاهش ۵۰ درصدی تعداد روتیفرها شده است. به این ترتیب مشاهده می‌شود که در مدت زمان ۶۰ دقیقه، میناب ازن بالاترین بازدهی را در کاهش تعداد روتیفرها داشته است و در مدت زمان ۳۰ تا ۱۸۰ دقیقه، میناب ازن بالاترین و میناب هوا کم‌ترین بازدهی را در کاهش تعداد روتیفرها داشته است. در مورد حذف روتیفرها، پژوهشگرانی مانند وو و همکاران<sup>[۶۹]</sup> نیز مطالعاتی انجام داده‌اند. آن‌ها با پیش ازن‌زنی با غلظت ۰/۵ میلی‌گرم بر لیتر و استفاده از فرآیند انعقاد و ته‌نشینی، موفق شدند مقدار روتیفرها را به میزان ۹۴ درصد کاهش دهند. همان‌طور که در پژوهش حاضر مشاهده شد، میناب ازن توانایی بالایی در حذف روتیفرهای موجود در آب خام را دارد و به کاهش تعداد آن‌ها در مراحل بعدی تصفیه و نیز کاهش مواد مصرفی از جمله منعقد کننده‌ها کمک می‌کند.

---

<sup>۱</sup>Wu et al.

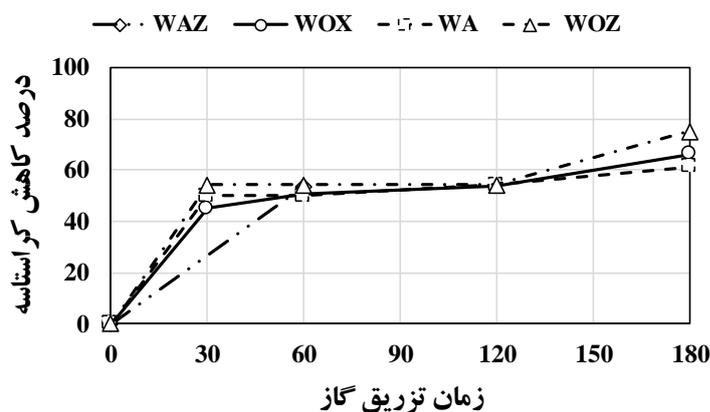


شکل ۴-۲۱: نمودار مقایسه درصد کاهش تعداد روتیفرها با زمان برای آب دارای میناب هوا (WA)، اکسیژن (WOX)، ازن (WOZ) و ترکیب هوا و ازن (WAZ) نسبت به آب خام

#### ۴-۶-۱۱ مقایسه تأثیر تزریق گازهای مختلف به آب خام در کاهش تعداد کراستاسه‌ها

در شکل ۴-۲۲ تأثیر تزریق گازهای هوا، اکسیژن، ازن و ترکیب هوا و ازن به آب خام، در کاهش تعداد کراستاسه‌ها در زمان‌های مختلف، ارائه شده است. پس از تزریق میناب هوا به آب خام، تعداد کراستاسه‌ها در مدت زمان ۳۰ تا ۱۸۰ دقیقه، به ترتیب از ۵۰ تا ۶۱/۳۱ درصد کاهش یافته است. همچنین تزریق میناب اکسیژن به آب خام، موجب کاهش ۴۵/۱۵ تا ۶۶/۲۱ درصدی تعداد کراستاسه‌ها در مدت زمان ۳۰ تا ۱۸۰ دقیقه شده است. تزریق میناب ازن به آب خام در مدت زمان ۳۰ تا ۱۸۰ دقیقه، تعداد کراستاسه‌ها را از ۵۴/۳۱ تا ۷۵/۲۰ درصد، کاهش داده است و در مدت زمان ۳۰ تا ۱۲۰ دقیقه، نرخ کاهش تعداد کراستاسه‌ها ثابت بوده و پس از ۱۲۰ دقیقه افزایش یافته است. تزریق ترکیب میناب هوا و ازن در مدت زمان ۶۰ دقیقه، موجب کاهش ۵۳/۵۹ درصدی تعداد کراستاسه‌ها شده است. به این ترتیب مشاهده می‌شود که در مدت زمان ۶۰ دقیقه، میناب ازن بالاترین بازدهی را در کاهش تعداد کراستاسه‌ها داشته است و در مدت زمان ۳۰ تا ۱۸۰ دقیقه، میناب ازن بالاترین و میناب هوا کم‌ترین بازدهی را در کاهش تعداد کراستاسه‌ها داشته است. برای مقایسه با

نتایج سایر پژوهش‌ها می‌توان به مطالعه وو و همکاران<sup>۱</sup> [۶۹] که به بررسی حذف کراستاسه‌ها در آب خام پرداختند، اشاره نمود. آن‌ها نتیجه گرفتند پیش‌ازن‌زنی با غلظت ۰/۵ میلی‌گرم بر لیتر و به کارگیری فرآیند انعقاد و ته‌نشینی، کاهش ۸۶ درصدی کراستاسه‌ها را در پی دارد. در حالی که در پژوهش حاضر، بدون استفاده از مواد منعقدکننده، میناب ازن موجب حذف بیش از ۷۰ درصدی کراستاسه‌ها شده و به افزایش بازدهی مراحل بعدی فرآیند تصفیه، کمک کرده است.

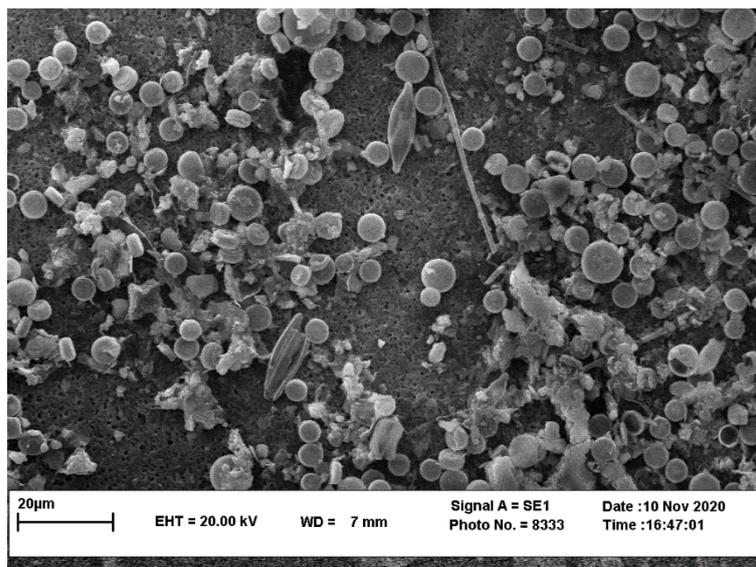


شکل ۴-۲۲: نمودار مقایسه درصد کاهش تعداد کراستاسه‌ها با زمان برای آب دارای میناب هوا (WA)، اکسیژن (WOX)، ازن (WOZ) و ترکیب هوا و ازن (WAZ) نسبت به آب خام

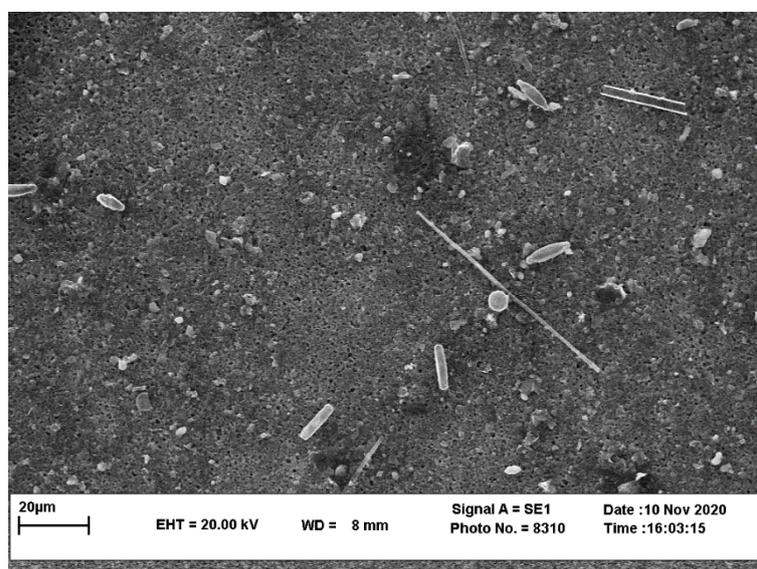
## ۴-۷ تحلیل آزمایش SEM

اثر میکرو-نانو حباب‌ها بر روی ریزموجودات و تخریب سلولی آن‌ها با انجام عکس‌برداری به وسیله میکروسکوپ الکترونی، مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آزمایش‌های SEM برای نمونه آب خام و نمونه آب دارای میناب ازن در شکل ۴-۲۳ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، پس از تزریق میناب ازن به مدت ۶۰ دقیقه به آب خام، تراکم سلولی ریزموجودات به شدت کاهش یافته است.

<sup>۱</sup>Wu et al.



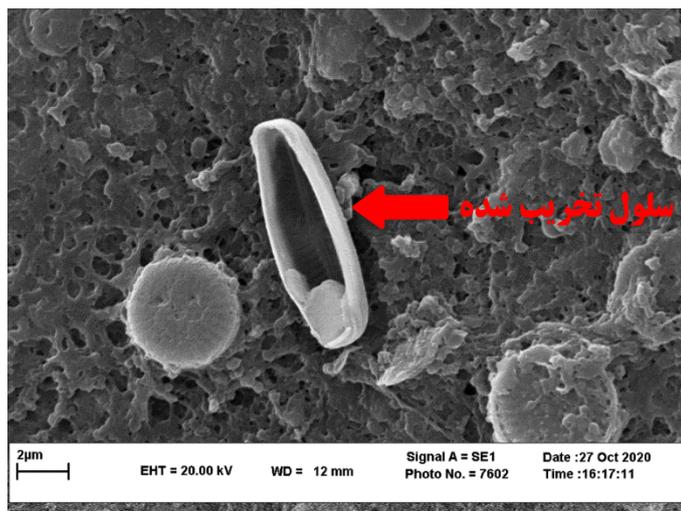
(الف)



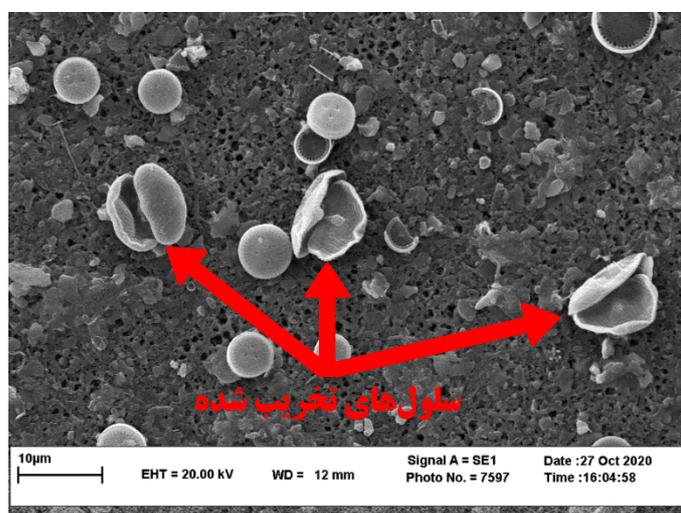
(ب)

شکل ۴-۲۳: تصویر تراکم سلولی ریزموجودات به دست آمده از آزمون SEM (الف) آب خام و (ب) آب دارای میناب ازن

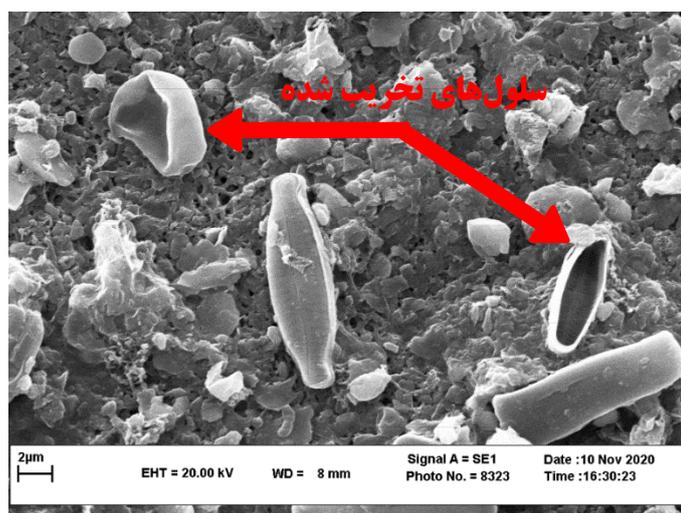
میکرو-نانو حباب‌ها با توجه به دارا بودن ویژگی‌های منحصر به فرد از جمله فشار داخلی بالا، توانایی تخریب سلول‌ها را دارند. تخریب سلول‌های جلبک به وسیله‌ی فرآیند ازن‌زنی، با حملات مستقیم مولکول‌های ازن و یا حملات پی در پی و غیر انتخابی رادیکال‌های فعال ناشی از تجزیه مولکول‌های ازن در محیط واکنش انجام می‌شود [۶۳]. در شکل ۴-۲۴ تخریب سلول‌های ریزموجودات به وسیله‌ی میناب‌های هوا، اکسیژن و ازن در مدت زمان ۶۰ دقیقه نشان داده شده است.



(الف)



(ب)



(پ)

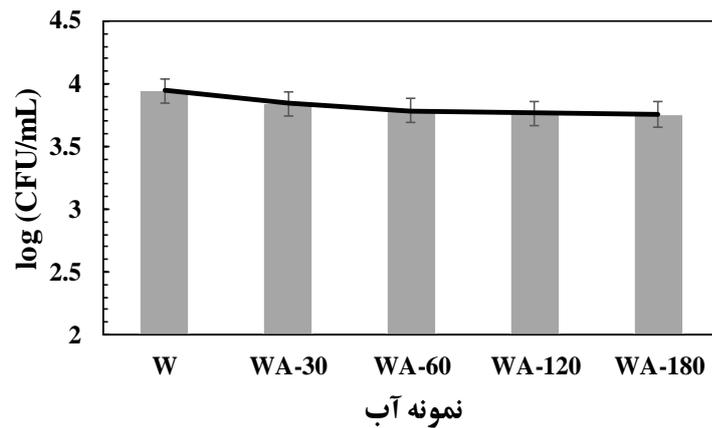
شکل ۴-۲۴: تخریب سلولی دیاتومه‌های مختلف در مدت زمان ۶۰ دقیقه به وسیله میناب‌های مختلف (الف) دیاتومه *Achnantheidium* با میناب هوا؛ (ب) دیاتومه *Cyclotella* با میناب اکسیژن و (پ) دیاتومه‌های *Cyclotella* و *Achnantheidium* با میناب ازن

#### ۴-۸ تأثیر میکرو-نانو حباب‌ها بر تعداد باکتری‌های هتروتروف

برای بررسی اثر تزریق میناب هوا، اکسیژن، ازن و ترکیب میناب هوا و ازن بر کاهش تعداد باکتری‌های هتروتروف آب خام، آزمون شرح داده شده در فصل گذشته، در زمان‌های ۳۰، ۶۰، ۱۲۰ و ۱۸۰ دقیقه سه بار تکرار شده و از نتایج به دست آمده میانگین‌گیری شده است. علاوه بر این، انحراف معیار نتایج هر یک از آزمون‌ها در مقایسه با میانگین نتایج محاسبه شده است. همان‌طور که قبلاً گفته شد، از گاز هوا و اکسیژن با نرخ ورودی پنج لیتر بر دقیقه به مولد میناب و از گاز ازن با نرخ تولیدی پنج گرم بر ساعت به مولد میناب، استفاده شده و حجم آب نیز ثابت در نظر گرفته شده است. در ادامه به بررسی اثرات تزریق هر گاز بر کاهش تعداد باکتری‌های هتروتروف پرداخته شده است.

#### ۴-۸-۱ اثر میکرو-نانو حباب‌های هوا بر تعداد باکتری‌های هتروتروف

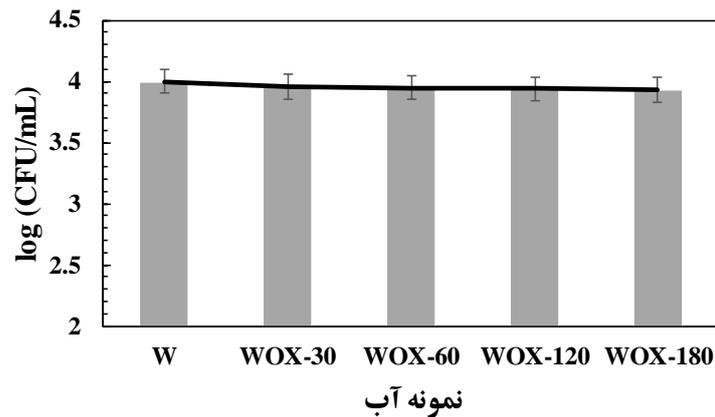
بر اساس آزمون‌های انجام شده برای بررسی اثر تزریق میناب هوا بر کاهش تعداد باکتری‌های هتروتروف آب خام، نمودار لگاریتمی میانگین تعداد کلنی‌های تشکیل‌شده در هر میلی‌لیتر (CFU/mL) مطابق شکل ۴-۲۵ رسم شده است. در این نمودار، W و WA به ترتیب معرف نمونه آب خام و نمونه آب دارای میناب هوا در زمان‌های مختلف پس از تزریق است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تزریق میناب هوا موجب کاهش ۰/۱۰ لگاریتمی باکتری‌های هتروتروف در ۳۰ دقیقه ابتدایی تزریق شده است. در زمان‌های ۶۰ و ۱۲۰ دقیقه پس از تزریق، باکتری‌های هتروتروف به ترتیب به میزان ۰/۱۶ و ۰/۱۸ لگاریتمی کاهش پیدا کرده است. در پایان آزمایش و پس از گذشت ۱۸۰ دقیقه از آغاز تزریق هوا، کاهش ۰/۱۹ لگاریتمی باکتری‌های هتروتروف قابل مشاهده است.



شکل ۴-۲۵: نمودار لگاریتمی میانگین تعداد کلنی‌های تشکیل شده در هر میلی‌لیتر برای آب خام در مقایسه با آب دارای میناب هوا در زمان‌های ۳۰، ۶۰، ۱۲۰ و ۱۸۰ دقیقه

#### ۴-۸-۲ اثر میکرو-نانو حباب‌های اکسیژن بر تعداد باکتری‌های هتروتروف

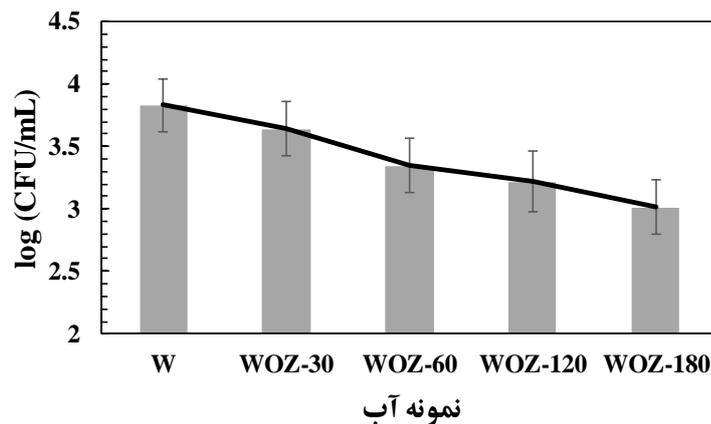
اثر تزریق میناب اکسیژن بر کاهش تعداد باکتری‌های هتروتروف آب خام، بر اساس نمودار لگاریتمی میانگین تعداد کلنی‌های تشکیل شده در هر میلی‌لیتر (CFU/mL) مطابق شکل ۴-۲۶ نشان داده شده است. در این نمودار، W و WOX به ترتیب معرف نمونه آب خام و نمونه آب دارای میناب اکسیژن در زمان‌های مختلف پس از تزریق است. با توجه به نمودار، تزریق میناب اکسیژن در زمان‌های ۳۰، ۶۰، ۱۲۰ و ۱۸۰ دقیقه، به ترتیب موجب کاهش ۰/۰۴۵، ۰/۰۵۵، ۰/۰۶ و ۰/۰۸ لگاریتمی باکتری‌های هتروتروف شده است.



شکل ۴-۲۶: نمودار لگاریتمی میانگین تعداد کلنی‌های تشکیل شده در هر میلی‌لیتر برای آب خام در مقایسه با آب دارای میناب اکسیژن در زمان‌های ۳۰، ۶۰، ۱۲۰ و ۱۸۰ دقیقه

#### ۴-۸-۳ اثر میکرو-نانو حباب‌های ازن بر تعداد باکتری‌های هتروتروف

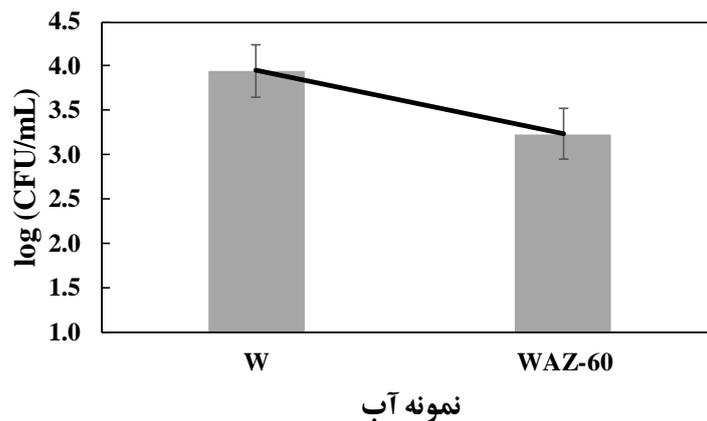
در شکل ۴-۲۷، نمودار لگاریتمی میانگین تعداد کلنی‌های تشکیل شده در هر میلی‌لیتر (CFU/mL)، بر اساس آزمون‌های انجام شده برای بررسی اثر تزریق میناب ازن بر کاهش تعداد باکتری‌های هتروتروف آب خام، رسم شده است. در این نمودار، W و WOZ به ترتیب معرف نمونه آب خام و نمونه آب دارای میناب ازن در زمان‌های مختلف پس از تزریق است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تزریق میناب ازن، به ترتیب موجب کاهش ۰/۱۸ و ۰/۴۸ لگاریتمی باکتری‌های هتروتروف در زمان‌های ۳۰ و ۶۰ دقیقه شده است. همچنین در زمان‌های ۱۲۰ و ۱۸۰ دقیقه پس از تزریق میناب ازن، مقدار لگاریتمی باکتری‌های هتروتروف، به ترتیب به میزان ۰/۶۱ و ۰/۸۲ لگاریتم کاهش پیدا کرده است.



شکل ۴-۲۷: نمودار لگاریتمی میانگین تعداد کلنی‌های تشکیل‌شده در هر میلی‌لیتر برای آب خام در مقایسه با آب دارای میناب ازن در زمان‌های ۳۰، ۶۰، ۱۲۰ و ۱۸۰ دقیقه

#### ۴-۸-۴ اثر ترکیب میکرو-نانو حباب‌های هوا و ازن بر تعداد باکتری‌های هتروتروف

اثر تزریق میناب هوا به مدت ۳۰ دقیقه و سپس تزریق میناب ازن به مدت ۳۰ دقیقه (در مجموع ۶۰ دقیقه)، بر کاهش تعداد باکتری‌های هتروتروف آب خام، بر اساس نمودار لگاریتمی میانگین تعداد کلنی‌های تشکیل‌شده در هر میلی‌لیتر (CFU/mL) مطابق شکل ۴-۲۸ نشان داده شده است. در این نمودار، W و WAZ به ترتیب معرف نمونه آب خام و نمونه آب دارای میناب هوا و ازن در زمان ۶۰ دقیقه پس از تزریق است. با توجه به نمودار، تزریق میناب هوا و ازن در زمان ۶۰ دقیقه، موجب کاهش ۰/۷۲ لگاریتمی باکتری‌های هتروتروف شده است.

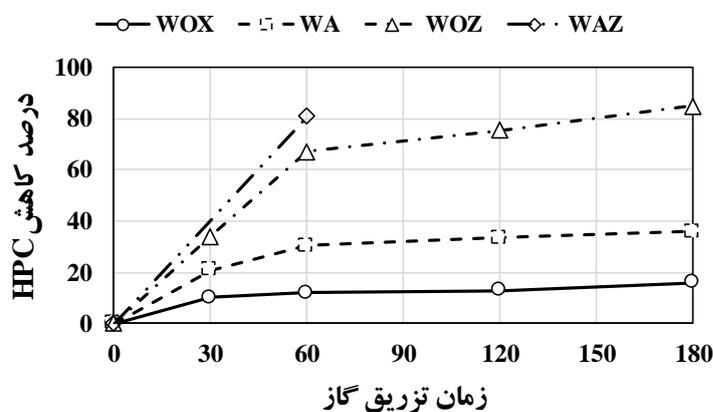


شکل ۴-۲۸: نمودار لگاریتمی میانگین تعداد کلنی‌های تشکیل شده در هر میلی‌لیتر برای آب خام در مقایسه با آب دارای میناب هوا و ازن در زمان ۶۰ دقیقه

#### ۴-۸-۵ مقایسه تأثیر تزریق گازهای مختلف به آب خام در کاهش تعداد باکتری‌های هتروتروف

تأثیر تزریق گازهای هوا، اکسیژن، ازن و ترکیب هوا و ازن به آب خام، در کاهش باکتری‌های هتروتروف در زمان‌های مختلف، در شکل ۴-۲۹ مورد بررسی قرار گرفته است. پس از تزریق میناب هوا به آب خام، تعداد باکتری‌های هتروتروف در مدت زمان ۳۰ تا ۱۸۰ دقیقه، به ترتیب از ۲۰/۶۸ تا ۳۵/۷۰ درصد کاهش یافته است. همچنین تزریق میناب اکسیژن به آب خام، موجب کاهش ۹/۹۱ تا ۱۶ درصدی تعداد باکتری‌های هتروتروف در مدت زمان ۳۰ تا ۱۸۰ دقیقه شده است. تزریق میناب ازن به آب خام در مدت زمان ۳۰ تا ۱۸۰ دقیقه، تعداد باکتری‌های هتروتروف را از ۳۴/۰۸ تا ۸۴/۷۵ درصد، کاهش داده است. تزریق ترکیب میناب هوا و ازن در مدت زمان ۶۰ دقیقه، موجب کاهش ۸۰/۹۷ درصدی تعداد باکتری‌های هتروتروف شده است. به این ترتیب مشاهده می‌شود که در مدت زمان ۶۰ دقیقه، ترکیب میناب هوا و ازن بالاترین بازدهی را در کاهش باکتری‌های هتروتروف داشته است و در مدت زمان ۳۰ تا ۱۸۰ دقیقه، میناب ازن بالاترین و میناب اکسیژن کم‌ترین بازدهی را در کاهش باکتری‌های هتروتروف داشته است. دلیل بازدهی بالاتر میناب ازن در کاهش تعداد باکتری‌های هتروتروف را می‌توان ناشی از تولید بیش‌ترین رادیکال‌های هیدروکسیل دانست [۵۳]. علاوه بر این

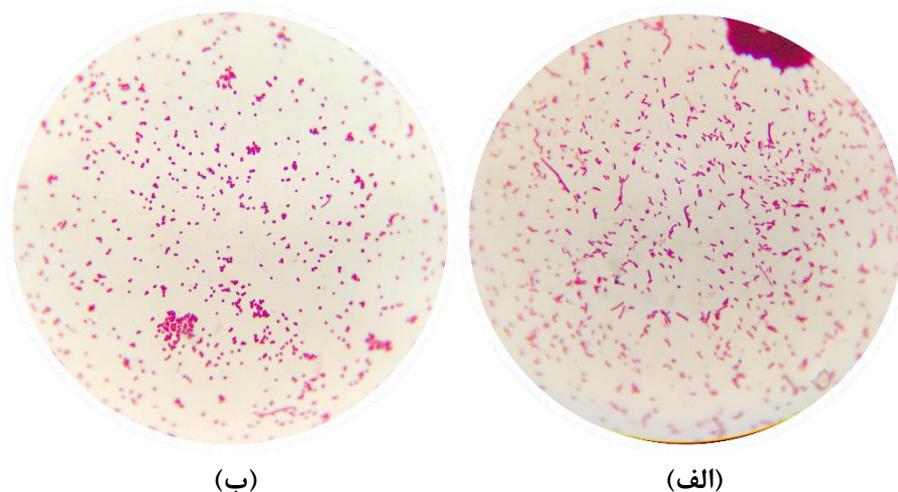
مشاهده می‌شود که نرخ حذف باکتری‌های هتروتروف پس از گذشت ۶۰ دقیقه از آغاز تزریق کاهش یافته و برای میناب‌های اکسیژن و هوا تقریباً ثابت شده است. بنابراین در صورت استفاده از میناب هوا که بازدهی بالاتری از میناب اکسیژن در کاهش باکتری‌های هتروتروف دارد، تزریق ۶۰ دقیقه‌ای آن که موجب کاهش ۳۰ درصدی باکتری‌ها می‌شود، صرفه اقتصادی خواهد داشت. بدیهی است در صورتی که حذف مقادیر بیشتری از باکتری‌ها مورد نیاز باشد، باید از ترکیب میناب هوا و ازن استفاده نمود که در مدت زمان ۶۰ دقیقه، کاهش ۸۱ درصدی (بیش از دو برابر میناب هوا) باکتری‌های هتروتروف را در پی دارد.



شکل ۴-۲۹: نمودار مقایسه درصد کاهش تعداد باکتری‌های هتروتروف با زمان برای آب دارای میناب هوا (WA)، اکسیژن (WOX)، ازن (WOZ) و ترکیب هوا و ازن (WAZ) نسبت به آب خام

## ۴-۹ شناسایی اولیه باکتری‌ها

همان‌طور که در فصل قبل به آن اشاره شد، برای شناسایی اولیه باکتری‌ها، کلنی انتخاب شده باید رنگ‌آمیزی شود. باکتری‌های گرم منفی با رنگ قرمز یا صورتی و باکتری‌های گرم مثبت با رنگ آبی یا بنفش قابل شناسایی هستند. پس از رنگ‌آمیزی کلنی‌های مختلف نمونه‌های آب، باکتری‌های میله‌ای (باسیل) و کروی (کوکسی) شناسایی شدند که در شکل ۴-۳۰ نشان داده شده است.

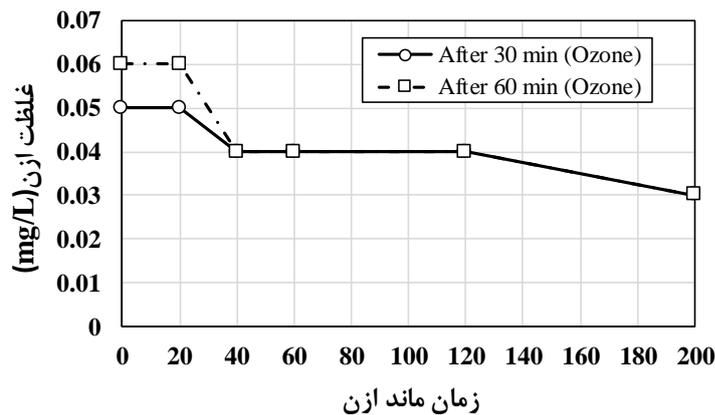


شکل ۴-۳۰: (الف) باکتری‌های باسیل گرم منفی (ب) باکتری‌های کوکسی گرم مثبت

#### ۴-۱۰ تعیین غلظت و زمان ماند ازن در آب

همان‌طور که در فصل قبل به آن اشاره شد، برای اندازه‌گیری غلظت ازن محلول در آب دارای میناب ازن، از دستگاه ازن‌متر استفاده شده است. به این ترتیب، غلظت و زمان ماند ازن پس از ۳۰ دقیقه تزریق میناب ازن توسط مولد میناب و نیز پس از ۶۰ دقیقه تزریق میناب ازن به آب خام، اندازه‌گیری شده است. همان‌طور که در شکل ۴-۳۱ مشاهده می‌شود، در صورت تزریق ۳۰ دقیقه‌ای میناب ازن به آب خام، در ابتدا تا مدت زمان ۲۰ دقیقه، غلظت ازن محلول در آب، ۰/۰۶ میلی‌گرم بر لیتر و پس از ۴۰ دقیقه، ۰/۰۴ میلی‌گرم بر لیتر بوده است. در مدت زمان ۴۰ تا ۱۲۰ دقیقه، غلظت ازن محلول در آب، ۰/۰۴ میلی‌گرم بر لیتر و پس از ۲۰۰ دقیقه به ۰/۰۳ میلی‌گرم بر لیتر، رسیده است.

در صورت تزریق ۶۰ دقیقه‌ای میناب ازن به آب خام، غلظت ازن محلول در آب، از ابتدا تا مدت زمان ۲۰ دقیقه، ۰/۰۵ میلی‌گرم بر لیتر، پس از ۴۰ تا ۱۲۰ و ۲۰۰ دقیقه، به ترتیب ۰/۰۴ و ۰/۰۳ میلی‌گرم بر لیتر به دست آمده است. به این ترتیب مشاهده می‌شود، در دو حالت ۳۰ و ۶۰ دقیقه تزریق میناب ازن به آب خام، پس از ۴۰ تا ۱۲۰ دقیقه، غلظت ازن محلول در آب ثابت باقی می‌ماند. همچنین نتایج نشان می‌دهد که میکرو-نانو حباب‌های ازن پس از مصرف ازن به وسیله‌ی انواع ریزموجودات، ماندگاری بالایی در آب دارند و می‌توانند بازدهی حذف ریزموجودات را افزایش دهند.



شکل ۴-۳۱: نمودار مقایسه غلظت و زمان ماند ازن در آب دارای میناب ازن در زمان‌های ۳۰ و ۶۰ دقیقه پس از تزریق میناب ازن

#### ۴-۱۱ جمع بندی

در این فصل، نتایج پارامترهای کیفی آب، شناسایی ریزموجودات، تأثیر میکرو-نانو حباب‌های هوا، اکسیژن، ازن و ترکیب هوا و ازن بر تعداد ریزموجودات، تحلیل آزمایش SEM، تأثیر میکرو-نانو حباب‌های هوا، اکسیژن، ازن و ترکیب هوا و ازن بر تعداد باکتری‌های هتروتروف، شناسایی اولیه باکتری‌ها، توزیع اندازه میکرو-نانو حباب‌ها و تعیین غلظت و زمان ماند ازن، مورد بحث و بررسی قرار گرفت. در فصل بعد، نتیجه‌گیری کلی از پژوهش، ارائه شده است.



## فصل ۵: نتیجه گیری و پیشنهادها

## ۵-۱ مقدمه

این پژوهش با هدف گندزدایی آب خام ورودی به تصفیه‌خانه آب با استفاده از فناوری میکرو-نانو حباب انجام گردید. در این فصل، به ارائه خلاصه‌ای از نتایج به دست آمده از آزمایش‌ها و تأثیر فناوری میکرو-نانو حباب بر روی انواع ریزموجودات شناسایی شده و باکتری‌های هتروتروف، پرداخته شده است. در انتها نیز پیشنهاداتی پیرامون ادامه و تکمیل پژوهش انجام شده ارائه شده است.

## ۵-۲ جمع‌بندی نتایج پارامترهای کیفی آب

با توجه به نتایج به دست آمده، تزریق میناب‌های هوا، اکسیژن، ازن و ترکیب میناب‌های هوا و ازن به آب خام، منجر به بهبود پارامترهای کیفی آب نظیر دما، pH، کدورت، هدایت الکتریکی (EC) و کل مواد جامد محلول (TDS) می‌شود. به طوری که موجب کاهش کدورت آب و TDS شده و افزایش pH و EC را به همراه داشته است.

## ۵-۳ جمع‌بندی نتایج توزیع اندازه میکرو-نانو حباب‌ها

با اندازه‌گیری ذرات میکرو-نانو حباب‌های تولیدی توسط مولد میناب با گاز اکسیژن، محدوده اندازه ذرات ۱۰۲ تا ۹۷۷۵ نانومتر به دست آمد. همچنین قطر متوسط ذرات بر اساس تعداد و شدت پراکندگی، به ترتیب برابر با ۴۳۵/۱۱ و ۱۶۶۰/۴۴ نانومتر تعیین شد.

## ۵-۴ جمع‌بندی نتایج اندازه‌گیری پتانسیل زتا

با توجه به اندازه‌گیری پتانسیل زتا برای آب خام و آب دارای میناب اکسیژن، مشخص شد که میانگین پتانسیل زتا به دلیل افزایش pH و نیز کاهش قطر حباب‌ها، افزایش یافته است و نمونه آب نسبت به

حالت اولیه پایدارتر شده است. همچنین طبق نتایج به دست آمده، تزریق میناب اکسیژن به آب خام، منجر به افزایش تحرک پذیری ذرات شده است.

## ۵-۵ جمع بندی نتایج شناسایی ریز موجودات و تأثیر میکرو-نانو حبابها بر تعداد ریز موجودات

با توجه به آزمایش‌های انجام شده، انواع جلبک‌های سبز، جلبک‌های سبز-آبی، دیاتومه‌ها، داینوفیتاها، نماتودها، روتیفرها و کراستاسه‌ها در نمونه‌های آب شناسایی شدند و نتایج تأثیر میکرو-نانو حباب‌های هوا، اکسیژن، ازن و ترکیب هوا و ازن در آب خام، بر روی هر یک از ریز موجودات ذکر شده، به طور خلاصه ارائه شده است.

✓ میناب ازن بیشترین تأثیر را بر جلبک‌های سبز داشته و موجب کاهش ۷۱ درصدی تعداد جلبک‌های سبز در مدت زمان ۱۸۰ دقیقه‌ای تزریق میناب ازن به آب خام شده است. در مدت زمان ۳۰ دقیقه پس از تزریق، بازدهی میناب ازن تقریباً معادل ۱۸۰ دقیقه تزریق میناب هوا و اکسیژن و نیز ۶۰ دقیقه تزریق ترکیب میناب هوا و ازن بوده است.

✓ در کاهش تعداد جلبک‌های سبز-آبی، میناب ازن بیشترین تأثیر را داشته و موجب حذف تمام جلبک‌های سبز-آبی در مدت زمان ۱۲۰ دقیقه‌ای تزریق میناب ازن به آب خام شده است. میناب‌های هوا، اکسیژن و ازن در مدت زمان ۳۰ دقیقه، عملکرد تقریباً مشابهی در کاهش تعداد جلبک‌های سبز-آبی داشتند. همچنین عملکرد ترکیب میناب هوا و ازن با عملکرد میناب هوا در مدت زمان ۶۰ دقیقه، تفاوت چندانی در کاهش تعداد جلبک‌های سبز-آبی نداشته است.

✓ میناب ازن بیشترین تأثیر را بر داینوفیتاها داشته و موجب کاهش ۶۸ درصدی تعداد داینوفیتاها در مدت زمان ۱۸۰ دقیقه‌ای تزریق میناب ازن به آب خام شده است. در مدت

زمان ۶۰ دقیقه‌ای تزریق، ترکیب میناب هوا و ازن عملکرد بهتری نسبت به سایر میناب‌های استفاده شده در آب خام داشته و موجب کاهش ۶۰ درصدی تعداد داینوفیتاها شده است. بنابراین، در صورتی که کاهش ۶۰ درصدی این ریزموجودات در این مرحله از تصفیه آب، مورد قبول باشد، تزریق ترکیبی میناب هوا و ازن به صرفه‌تر خواهد بود.

✓ عملکرد میناب ازن در کاهش تعداد دیاتومه‌ها از سایر میناب‌های استفاده شده، بهتر بوده است. در مدت زمان ۱۸۰ دقیقه‌ای تزریق میناب ازن به آب خام، تعداد دیاتومه‌ها ۷۵ درصد کاهش یافته است. همچنین ترکیب میناب هوا و ازن در مدت زمان ۶۰ دقیقه‌ای تزریق، عملکرد بهتری داشته است و موجب کاهش ۶۱ درصدی تعداد دیاتومه‌ها شده است. بنابراین، در صورتی که کاهش ۶۰ درصدی این ریزموجودات در این مرحله از تصفیه آب، مورد قبول باشد، تزریق ترکیبی میناب هوا و ازن به صرفه‌تر خواهد بود.

✓ در کاهش تعداد نماتودها، میناب ازن بیشترین تأثیر را داشته و موجب کاهش ۹۰ درصدی تعداد نماتودها در مدت زمان ۱۲۰ دقیقه‌ای تزریق میناب ازن به آب خام شده است. استفاده از ترکیب میناب هوا و ازن در مدت زمان ۶۰ دقیقه‌ای تزریق به منظور حذف نماتودها، در مقایسه با سایر میناب‌های استفاده شده، توجیهی ندارد.

✓ عملکرد میناب ازن در کاهش تعداد روتیفرها، نسبت به سایر میناب‌های استفاده شده، بهتر بوده است. میناب هوا تأثیری در کاهش تعداد روتیفرها نداشته است. استفاده از میناب اکسیژن تا مدت زمان ۶۰ دقیقه‌ای تزریق به آب خام، مؤثر بوده است. تزریق ۶۰ دقیقه‌ای میناب ازن و ترکیب میناب هوا و ازن به آب خام، تأثیر مشابهی در کاهش تعداد روتیفرها داشته است و با در نظر گرفتن جنبه‌های اقتصادی، می‌توان نوع تزریق میناب به آب خام را انتخاب کرد.

✓ تأثیر میناب ازن در کاهش تعداد کراساسه‌ها بهتر بوده است و موجب کاهش ۷۵ درصدی

تعداد آن‌ها در مدت زمان ۱۸۰ دقیقه‌ای تزریق به آب خام شده است. در مدت زمان ۶۰ دقیقه‌ای تزریق به آب خام، تمام روش‌های استفاده شده، عملکرد تقریباً یکسانی داشتند و موجب کاهش ۵۰ درصدی کراستاسه‌ها شده‌اند.

## ۵-۶ جمع‌بندی نتایج آزمایش SEM

نتایج به دست آمده از آزمایش SEM و عکس‌برداری با استفاده از میکروسکوپ الکترونی، نشان داد که میناب‌های هوا، اکسیژن و ازن در مدت زمان ۶۰ دقیقه، توانایی تخریب سلول‌های ریزموجودات از جمله انواع دیاتومه‌ها را دارند.

## ۵-۷ جمع‌بندی نتایج تأثیر میکرو-نانو حباب‌ها بر تعداد باکتری‌های هتروتروف

با توجه به نتایج به دست آمده، ترکیب میناب هوا و ازن بیشترین بازدهی را نسبت به میناب هوا و اکسیژن بر کاهش تعداد باکتری‌های هتروتروف دارد؛ به گونه‌ای که در مدت زمان ۶۰ دقیقه، به ترتیب حدود ۲/۷، ۶/۸ و ۱/۲ برابر میناب هوا، اکسیژن و ازن، تعداد باکتری‌های هتروتروف را کاهش داده است.

نرخ کاهش باکتری‌های هتروتروف در آب خام با استفاده از میناب هوا و اکسیژن تا مدت زمان ۶۰ دقیقه‌ای تزریق، افزایش یافته و پس از آن تقریباً ثابت می‌شود. در حالی که در میناب ازن، هرچند که نرخ کاهش باکتری‌های هتروتروف، پس از مدت زمان ۶۰ دقیقه کمتر شده است، اما همچنان در کاهش باکتری‌های هتروتروف مؤثر بوده است.

استفاده از ترکیب میناب هوا و ازن با توجه به کاهش ۸۱ درصدی تعداد باکتری‌های هتروتروف، به دلیل بازدهی بالا می‌تواند صرفه اقتصادی داشته باشد.

## ۵-۸ جمع‌بندی نتایج تعیین غلظت و زمان ماند ازن در آب

با توجه به نتایج به دست آمده، در صورت ۳۰ دقیقه تزریق میناب ازن به آب خام و نیز تزریق ۶۰ دقیقه‌ای میناب ازن به آب خام، میزان غلظت ازن پس از مدت ۲۰۰ دقیقه به ۰/۰۳ میلی‌گرم بر لیتر رسیده است که نشان دهنده‌ی ماندگاری بالای میکرو-نانو حباب‌های ازن در آب است.

## ۵-۹ نتیجه‌گیری کلی

در پایان، نتایج به دست آمده از این پژوهش را می‌توان به شرح زیر ارائه نمود:

- ۱- استفاده از میکرو-نانو حباب‌ها موجب کاهش کدورت و افزایش pH در آب می‌شود.
- ۲- میکرو-نانو حباب ازن در حذف تمام گونه‌های شناسایی شده از ریزموجودات، بالاترین بازدهی و کارایی را دارد.
- ۳- با توجه به تغییر در تعداد هر یک از ریزموجودات در ماه‌های مختلف سال، برای داشتن بازدهی بیشتر، نوع گاز تزریقی باید متناسب با ریزموجودات شناسایی شده انتخاب شود.
- ۴- مدت زمان تزریق و در نظر گرفتن زمان ماند آب و عدم ایجاد تداخل در ادامه‌ی فرآیندهای تصفیه آب ضروری است.
- ۵- با توجه به اولویت حذف گونه مورد نظر از ریزموجودات، انتخاب نوع گاز با توجه به جنبه‌های اقتصادی طرح انجام شود.
- ۶- با توجه به عملکرد بسیار بالای هر یک از میناب‌های هوا، اکسیژن و ازن در کاهش تعداد ریزموجودات، استفاده از آن‌ها می‌تواند در مدت زمان ۳۰ دقیقه و نیز ترکیب میناب هوا و ازن در مدت زمان ۶۰ دقیقه، توجیه اقتصادی قابل توجهی داشته باشد.
- ۷- ترکیب میکرو-نانو حباب هوا و ازن بالاترین بازدهی را در حذف باکتری‌های هتروتروف دارد و از نظر اقتصادی به صرفه است.

۸- میکرو-نانو حباب‌ها به دلیل ماندگاری بالا در آب می‌توانند مفید واقع شوند؛ بطوری‌که در صورت استفاده از میناب ازن، ماندگاری ازن در آب بالا می‌رود و حضور ازن در آب منجر به بهبود ادامه فرآیندهای تصفیه آب می‌شود.

۹- میکرو-نانو حباب‌ها به دلیل کاهش گاز مصرفی برای گندزدایی و نیز بازدهی بالا در حذف ریزموجودات و بار میکروبی، در فرآیند تصفیه آب مؤثر و به صرفه هستند.

۱۰- استفاده از میکرو-نانو حباب‌ها در آب خام و حذف مقدار قابل توجه از انواع ریزموجودات، می‌تواند استفاده از مواد مصرفی در تصفیه آب از جمله منعقدکننده‌ها را کاهش دهد و نیز از اختلال در فرآیند فیلتراسیون جلوگیری کند.

## ۵-۱۰ پیشنهاد پژوهش‌های آتی

با توجه به پژوهش انجام شده و عملکرد قابل قبول میکرو-نانو حباب‌ها در گندزدایی، می‌توان انجام پژوهش‌های آتی به شرح زیر را پیشنهاد کرد:

۱- بررسی مکانیزم حذف هر یک از ریزموجودات با استفاده از میکرو-نانو حباب‌های هوا، اکسیژن و ازن

۲- بررسی اثر میکرو-نانو حباب‌های هوا، اکسیژن و ازن بر سایر ریزموجودات در آب و فاضلاب

۳- بررسی اثر میکرو-نانو حباب‌های هوا، اکسیژن و ازن بر کلیه‌ی کلی‌فرم‌ها و کلی‌فرم‌های مدفوعی در آب

۴- بررسی اثر میکرو-نانو حباب‌های هوا، اکسیژن و ازن بر انواع ویروس‌های موجود در آب و فاضلاب

۵- بررسی اثر ماند میکرو-نانو حباب‌های هوا، اکسیژن و ازن در آب بر کاهش ریزموجودات در آب و فاضلاب

[۱] پ وی، ه. س، روو، د. ر، چپانوگلاس، ج. (۱۳۹۳) "مهندسی محیط زیست: تصفیه آب و فاضلاب" جلد اول، ابراهیمی، س، کی نژاد، م، چاپ پنجم، انتشارات دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ص ۵۴۵.

[۲] Chen, J.-J., Yeh, H.-H., and Tseng, I. C. (2009). "Effect of ozone and permanganate on algae coagulation removal – Pilot and bench scale tests." **Chemosphere**, **74**, **6**, pp 840-846.

[۳] Pereira, V., Marques, R., Marques, M., Benoliel, M., and Crespo, M. B. (2013). "Free chlorine inactivation of fungi in drinking water sources." **Water research**, **47**, **2**, pp 517-523.

[۴] Lautenschlager, K., Hwang, C., Liu, W. T., Boon, N., Köster, O., Vrouwenvelder, H., Egli, T., and Hammes, F. (2013). "A microbiology-based multi-parametric approach towards assessing biological stability in drinking water distribution networks." **water research**, **47**, **9**, pp 3015-3025.

[۵] Ding, W., Jin, W., Cao, S., Zhou, X., Wang, C., Jiang, Q., Huang, H., Tu, R., Han, S. F., and Wang, Q. (2019). "Ozone disinfection of chlorine-resistant bacteria in drinking water." **Water Research**, **160**, pp 339-349.

[۶] Miao, H., and Tao, W. (2009). "The mechanisms of ozonation on cyanobacteria and its toxins removal." **Separation and Purification Technology**, **66**, **1**, pp 187-193.

[۷] Chu, L.-B., Xing, X.-H., Yu, A.-F., Zhou, Y.-N., Sun, X.-L., and Jurcik, B. (2007). "Enhanced ozonation of simulated dyestuff wastewater by microbubbles." **Chemosphere**, **68**, **10**, pp 1854-1860.

[۸] Agarwal, A., Ng, W. J., and Liu, Y. (2011). "Principle and applications of microbubble and nanobubble technology for water treatment." **Chemosphere**, **84**, **9**, pp 1175-1180.

[۹] Tsuge, H. (2014). "Micro-and nanobubbles: fundamentals and applications," Pan Stanford.

[۱۰] Hu, L., and Xia, Z. (2018). "Application of ozone micro-nano-bubbles to groundwater remediation." **Journal of Hazardous Materials**, **342**, pp 446-453.

[۱۱] Temesgen, T., Bui, T. T., Han, M., Kim, T.-i., and Park, H. (2017). "Micro and nanobubble technologies as a new horizon for water-treatment techniques: A review." **Advances in colloid and interface science**, **246**, pp 40-51.

[۱۲] Turner, W. (1961). "Microbubble persistence in fresh water." **The Journal of the Acoustical Society of America**, **33**, **9**, pp 1223-1233.

- [١٣] Ohgaki, K., Khanh, N. Q., Joden, Y., Tsuji, A., and Nakagawa, T. (2010). "Physicochemical approach to nanobubble solutions." **Chemical Engineering Science**, **65**, **3**, pp 1296-1300.
- [١٤] Xiao, Z., Aftab, T. B., and Li, D. (2019). "Applications of micro–nano bubble technology in environmental pollution control." **Micro & Nano Letters**, **14**, **7**, pp 782-787.
- [١٥] Li, H., Hu, L., Song, D., and Al-Tabbaa, A. (2014). "Subsurface transport behavior of micro-nano bubbles and potential applications for groundwater remediation." **International journal of environmental research and public health**, **11**, **1**, pp 473-486.
- [١٦] Takahashi, M. (2005). "ζ potential of microbubbles in aqueous solutions: electrical properties of the gas– water interface." **The Journal of Physical Chemistry B**, **109**, **46**, pp 21858-21864.
- [١٧] Takahashi, M., Chiba, K., and Li, P. (2007). "Free-radical generation from collapsing microbubbles in the absence of a dynamic stimulus." **The Journal of Physical Chemistry B**, **111**,**6**, pp 1343-1347.
- [١٨] Ushikubo, F. Y., Furukawa, T., Nakagawa, R., Enari, M., Makino, Y., Kawagoe, Y., Shiina, T., and Oshita, S. (2010). "Evidence of the existence and the stability of nano-bubbles in water." **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, **361**, **1**, pp 31-37.
- [١٩] Li, P., Takahashi, M., and Chiba, K. (2009). "Enhanced free-radical generation by shrinking microbubbles using a copper catalyst." **Chemosphere**, **77**, **8**, pp 1157-1160.
- [٢٠] Takahashi, M., Chiba, K., and Li, P. (2007). "Formation of hydroxyl radicals by collapsing ozone microbubbles under strongly acidic conditions." **The Journal of Physical Chemistry B**, **111**, **39**, pp 11443-11446.
- [٢١] Etchepare, R., Azevedo, A., Calgaroto, S., and Rubio, J. (2017). "Removal of ferric hydroxide by flotation with micro and nanobubbles." **Separation and Purification Technology**, **184**, pp 347-353.
- [٢٢] Zhang, M., Qiu, L., and Liu, G. "Basic characteristics and application of micro-nano bubbles in water treatment." *Proc., IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, IOP Publishing, 042050.
- [٢٣] Oliveira, H., Azevedo, A., and Rubio, J. (2018). "Nanobubbles generation in a high-rate hydrodynamic cavitation tube." **Minerals Engineering**, **116**, pp 32-34.
- [٢٤] Yang, S., Tsai, P., Kooij, E. S., Prosperetti, A., Zandvliet, H. J., and Lohse, D. (2009). "Electrolytically generated nanobubbles on highly orientated pyrolytic graphite surfaces." **Langmuir**, **25**, **3**, pp 1466-1474.
- [٢٥] Cho, S.-H., Kim, J.-Y., Chun, J.-H., and Kim, J.-D. (2005). "Ultrasonic formation of nanobubbles and their zeta-potentials in aqueous electrolyte and surfactant solutions." **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, **269**, **1-3**, pp 28-34.

- [२६] Qiu, J., Zou, Z., Wang, S., Wang, X., Wang, L., Dong, Y., Zhao, H., Zhang, L., and Hu, J. (2017). "Formation and stability of bulk nanobubbles generated by ethanol-water exchange." **ChemPhysChem**, **18**, **10**, pp 1345-1350.
- [२७] Yamasaki, K., Uda, K., and Chuhjoh, K. (2009). "Wastewater treatment equipment and method of wastewater treatment." Google Patents.
- [२८] Yamasaki, K., Sakata, K., and Chuhjoh, K. (2010). "Water treatment method and water treatment system." Google Patents.
- [२९] Sumikura, M., Hidaka, M., Murakami, H., Nobutomo, Y., and Murakami, T. (2007). "Ozone micro-bubble disinfection method for wastewater reuse system." **Water Science and Technology**, **56**, **5**, pp 53-61.
- [३०] Hernot, S., and Klibanov, A. L. (2008). "Microbubbles in ultrasound-triggered drug and gene delivery." **Advanced drug delivery reviews**, **60**, **10**, pp 1153-1166.
- [३१] Lindner, J. R. (2004). "Microbubbles in medical imaging: current applications and future directions." **Nature reviews Drug discovery**, **3**, **6**, pp 527-533.
- [३२] Tsutsui, J. M., Xie, F., and Porter, R. T. (2004). "The use of microbubbles to target drug delivery." **Cardiovascular ultrasound**, **2**, **1**, pp 1-7.
- [३३] Akuzawa, H., Amagai, K., Funatsu, M., Takakusagi, F., Tabei, K., and Noda, Y. (2010). "Study on cleaning of pipe inner wall by micro-bubble flow." **Japanese Journal of Multiphase Flow**, **24**, **4**, pp 454-461.
- [३४] Roy, D., Tamayo, A., and Valsaraj, K. (1992). "Comparison of soil washing using conventional surfactant solutions and colloidal gas aphon suspensions." **Separation science and technology**, **27**, **12**, pp 1555-1568.
- [३५] Gotoh, Y. (2006). "Oil separation from oil polluted soil by micro bubble injection and separation mechanisms." **JJ Multiphase Flow**, **20**, pp 39-49.
- [३६] Xiaohui, D., Jingyu, X., Yingxiang, W., and Donghong, L. (2011). "Research on the technology of oil removal by dynamic state micro-bubbles flotation." **Industrial Water Treatment**, **31**, **4**, pp 89-90.
- [३७] Tsutsumi, H. (2010). "Application of microbubble injector to marine fish farming and its future perspective." **Bull Soc Sea Water Sci Jpn**, **64**, pp 31-38.
- [३८] Soli, K. W., Yoshizumi, A., Motomatsu, A., Yamakawa, M., Yamasaki, M., Mishima, T., Miyaji, N., Honjoh, K.-I., and Miyamoto, T. (2010). "Decontamination of fresh produce by the use of slightly acidic hypochlorous water following pretreatment with sucrose fatty acid ester under microbubble generation." **Food Control**, **21**, **9**, pp 1240-1244.
- [३९] Li, P., and Tsuge, H. (2006). "Water treatment by induced air flotation using microbubbles." **Journal of Chemical Engineering of Japan**, **39**, **8**, pp 896-903.
- [४०] Li, P., Takahashi, M., and Chiba, K. (2009). "Degradation of phenol by the collapse of microbubbles." **Chemosphere**, **75**, **10**, pp 1371-1375.

- [٤١] Liu, S., Wang, Q., Ma, H., Huang, P., Li, J., and Kikuchi, T. (2010). "Effect of micro-bubbles on coagulation flotation process of dyeing wastewater." **Separation and purification Technology**, **71**, **3**, pp 337-346.
- [٤٢] Li, H., Hu, L., and Xia, Z. (2013). "Impact of groundwater salinity on bioremediation enhanced by micro-nano bubbles." **Materials**, **6**, **9**, pp 3676-3687.
- [٤٣] Sun, Y., Wang, S., and Niu, J. (2018). "Microbial community evolution of black and stinking rivers during in situ remediation through micro-nano bubble and submerged resin floating bed technology." **Bioresource technology**, **258**, pp 187-194.
- [٤٤] Suffet, I., Mallevalle, J., and Kawczynski, E. (1995). "Advances in taste-and-odor treatment and control," American Water Works Association.
- [٤٥] Plummer, J. D., and Edzwald, J. K. (2001). "Effect of ozone on algae as precursors for trihalomethane and haloacetic acid production " **Environmental science & technology**, **35**, **18**, pp 3661-3668.
- [٤٦] Plummer, J. D., and Edzwald, J. K. (2002). "Effects of chlorine and ozone on algal cell properties and removal of algae by coagulation." **Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua**, **51**, **6**, pp 307-318.
- [٤٧] Orta de Velasquez, M. T., Rojas-Valencia, M. N., and Ayala, A. (2008). "Wastewater disinfection using ozone to remove free-living, highly pathogenic bacteria and amoebae." **Ozone: Science and Engineering**, **30**, **5**, pp 367-375.
- [٤٨] Chen, J.-J., Yeh, H.-H., and Tseng, I.-C. (2009). "Effect of ozone and permanganate on algae coagulation removal—Pilot and bench scale tests." **Chemosphere**, **74**, **6**, pp 840-846.
- [٤٩] Fan, X., Tao, Y., Wang, L., Zhang, X., Lei, Y., Wang, Z., and Noguchi, H. (2014). "Performance of an integrated process combining ozonation with ceramic membrane ultra-filtration for advanced treatment of drinking water." **Desalination**, **335**, **1**, pp 47-54.
- [٥٠] Lüddecke, F., Heß, S., Gallert, C., Winter, J., Güde, H., and Löffler, H. (2015). "Removal of total and antibiotic resistant bacteria in advanced wastewater treatment by ozonation in combination with different filtering techniques." **Water research**, **69**, pp 243-251.
- [٥١] Tsuge, H., Li, P., Shimatani, N., Shimamura, Y., Nakata, H., and Ohira, M. (2009). "Fundamental study on disinfection effect of microbubbles." **Kagaku Kogaku Ronbunshu**, **35**, **5**, pp 548-552.
- [٥٢] Michioku, K. "An In-Situ Experiment on Oxygen Solubility of Micro-Bubble Aeration in A Eutrophic Dam-Reservoir." *Proc., Proc. Int. Symp. Dams for A Changing World, 2012*, 99-104.
- [٥٣] Liu, S., Wang, Q., Sun, T., Wu, C., and Shi, Y. (2012). "The effect of different types of micro-bubbles on the performance of the coagulation flotation process for coke waste-water." **Journal of Chemical Technology & Biotechnology**, **87**, **2**, pp 206-215.

- [۵۴] Zhang, F., Xi, J., Huang, J.-J., and Hu, H.-Y. (2013). "Effect of inlet ozone concentration on the performance of a micro-bubble ozonation system for inactivation of *Bacillus subtilis* spores." **Separation and Purification Technology**, **114**, pp 126-133.
- [۵۵] Bui, T. T., Nam, S.-N., and Han, M. (2015). "Micro-bubble flotation of freshwater algae: a comparative study of differing shapes and sizes." **Separation Science and Technology**, **50**, **7**, pp 1066-1072.
- [۵۶] Zhuang, H., Hong, X., Han, H., and Shan, S. (2016). "Effect of pure oxygen fine bubbles on the organic matter removal and bacterial community evolution treating coal gasification wastewater by membrane bioreactor." **Bioresource technology**, **221**, pp 262-269.
- [۵۷] Mohseni, E., Herrmann-Heber, R., Reinecke, S., and Hampel, U. (2019). "Bubble generation by micro-orifices with application on activated sludge wastewater treatment." **Chemical Engineering and Processing-Process Intensification**, pp 107511.
- [۵۸] Baird, R. B. (2017). "**Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**," Water Environment Federation, American Public Health Association, American Water Works Association.
- [۵۹] Chowdhury, S. (2012). "Heterotrophic bacteria in drinking water distribution system: a review." **Environmental monitoring and assessment**, **184**, **10**, pp 6087-6137.
- [۶۰] قرايلو د. و مرادده س. (۱۳۹۴) "تئوری پتانسیل زتا و چگونگی کارکرد دستگاه تفرق نور پویا در اندازه گیری این پتانسیل"، فصلنامه تخصصی دانش آزمایشگاهی ایران، شماره ۱، ص ۲۰-۱۴.
- [۶۱] Bellinger, E. G., and Sigeo, D. C. (2015). "**Freshwater algae: identification, enumeration and use as bioindicators**," John Wiley & Sons.
- [۶۲] Palumbo, F., Ziglio, G., and Van der Beken, A. (2002). "**Detection methods for algae, protozoa and helminths in fresh and drinking water**," Wiley Online Library.
- [۶۳] Khataee, A., Fazli, A., Fathinia, M., and Vafaei, F. (2019). "Simultaneous elimination of two species of algae from a contaminated water through ozonation process: mechanism and destruction intermediates." **Ozone: Science & Engineering**, **41**, **1**, pp 35-45.
- [۶۴] Bui, T. T., and Han, M. (2015). "Removal of *Phormidium* sp. by positively charged bubble flotation." **Minerals Engineering**, **72**, pp 108-114.
- [۶۵] Suwanvitaya, P., and Singhaphen, S. (2018). "Ozonation as cyanophyta control method for water treatment." **Engineering and Applied Science Research**, **45**, **3**, pp 235-239.
- [۶۶] Ewerts, H., Barnard, S., Swanepoel, A., Du Preez, H., and Janse van Vuuren, S. (2014). "Strategies of coagulant optimisation to improve the removal of turbidity and *Ceratium hirundinella* cells during conventional drinking water purification." **Water Science and Technology: Water Supply**, **14**, **5**, pp 820-828.

[67] Lee, J. D., Lee, M. S., Shin, W. S., Kim, Y.-H., and Choi, S. J. (2005) "(Removal of freshwater diatoms (*Synedra acus* and *Stephanodiscus* sp.) by preozonation and addition of polyamine coagulant-aid." **Korean Journal of Chemical Engineering**, **22**, **5**, pp 682-686.

[68] Kos, J., Brmež, M., Markić, M., and Sipos, L. (2020). "The Mortality of Nematodes in Drinking Water in the Presence of Ozone, Chlorine Dioxide, and Chlorine." **Ozone: Science & Engineering**, **42**, **2**, pp 120-127.

[69] Wu, Z., Tang, X., and Chen, H. (2021). "Seasonal and treatment-process variations in invertebrates in drinking water treatment plants." **Frontiers of Environmental Science & Engineering**, **15**, **4**, pp 1-10.



# Abstract

Nowadays, water treatment with maximum efficiency and minimum cost becomes necessary according to water resources reduction and pollution. One of the principal resources to supply drinking water is the water accumulated in the dam's reservoir. Many different pollution parameters in the raw water, including microbial contamination and the existence of the micro-organisms such as algae, are affected by the water quality. Therefore, novel technologies such as Micro-Nano Bubbles (MNBs) have been considered to achieve an efficient water treatment procedure. The effect of MNB technology on eliminating and reducing the different spectrums of the micro-organisms and the variation of the bacterial population in the dam reservoir's water was investigated by performing some experiments. For this purpose, the raw water entered the water treatment plant without any pretreatment, leading to the MNBs generator. Simultaneously, the air, oxygen, and ozone gases and the mixture of air and ozone gases were injected into the raw water. Since the experiments were performed on different days, the quality of the raw water and its microbial load was not controllable and this was one of the study's limitations. Investigating the impact of the type, quantity, and duration of the gas (air, oxygen, and ozone) injection on decreasing the micro-organisms and microbial load were the most important goals of this study. Various injection duration of the gases was applied to the system to assess the water quality parameters by identification and counting the number of the micro-organisms, measurement of the microbial load by the heterotrophic bacteria counting method, scanning electron microscope, analysis of the size of the MNBs, measurement of the zeta potential, measurement of ozone concentration and residual time in the water. The current study showed that the ozone MNBs have the maximum efficiency in eliminating and reducing all identified species of micro-organisms so that in the injection duration of 180 minutes, 68 to 100 percent of them were removed. Furthermore, it is found that using air, oxygen, and ozone MNBs for 30 minutes and the mixture of air and ozone MNBs for 60 minutes caused the maximum reduction rate of the micro-organisms, which can have considerable economic efficiency. Using the mix of air and ozone MNBs for 60 minutes leads to getting rid of 0.74 log (equivalent to 81 percent) of the Heterotrophic bacteria with acceptable efficiency. Generally, it could be concluded that the injection of MNBs in raw waters removes a wide range of micro-organisms and microbial load. Moreover, MNBs may decrease the doses of chemicals used, such as coagulants, in the next stage of the water treatment and prevent any disorders in the filtration process.

**Keywords:** Water Treatment, Micro-nano bubble, Microorganism, Heterotrophic Bacteria, Disinfection



Shahrood University of  
Technology

Faculty of Civil Engineering

M.Sc. Thesis in Environmental Engineering

# **Disinfection of the Raw Water in Water Treatment Plant Using Micro- Nano Bubble Technology**

By: Nima Nazeran

Supervisor:

Dr. Seyed Fazlolah Saghravani

Dr. Masoumeh Bahreini

September, 2021