

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی شاهرود  
دانشکده مهندسی عمران

پایان نامه کارشناسی ارشد  
گرایش آب

عنوان

بررسی آزمایشگاهی اثر میکرو – نانو حباب ها بر بهبود تصفیه هوازی فاضلاب شهری  
(مطالعه موردی فاضلاب شهری شهر شاهرود)

نگارش

مرتضی کریمی اندانی

اساتید راهنما:

سید فضل الله ساغروانی

شهریور ۱۳۹۵

## تقدیم‌نامه

تقدیم به خدایی که آفرید

... جهان را، انسان را، عقل را، علم را، معرفت را، عشق را

و به کسانی که عشقشان را در وجودم دمید

## سپاس‌گزاری

نخستین سپاس و ستایش از آن خداوندی است که بنده کوچکش را در دریای بیکران اندیشه، قطره‌ای ساخت تا وسعت آن را از دریچه اندیشه‌های ناب آموزگارانی بزرگ به تماشا نشیند. لذا اکنون که در سایه‌سار بنده‌نوازی‌هایش پایان‌نامه حاضر به انجام رسیده است، بر خود لازم می‌دانم تا مراتب سپاس را از بزرگوارانی به‌جا آورم که اگر دست یاریگرشان نبود، هرگز این پایان‌نامه به انجام نمی‌رسید.

به مصداق «من لم یشکر المخلوق لم یشکر الخالق» بسی شایسته است از استاد فرهیخته و فرزانه جناب آقای دکتر ساغروانی که باکرامتی چون خورشید، سرزمین دل را روشنی بخشیدند و گلشن سرای علم و دانش را با راهنمایی‌های کارساز و سازنده بارور ساختند و در کمال سعه‌صدر، با حسن خلق و فروتنی، از هیچ کمکی در این عرصه بر من دریغ ننمودند و زحمت راهنمایی این رساله را بر عهده گرفتند، تقدیر و تشکر نمایم.

با تقدیر و درود فراوان از اساتید بزرگوار سرکار خانم دکتر دهر آزما و جناب آقای دکتر شامخی که زحمت داوری این پایان‌نامه را متقبل شدند؛

و با تشکر خالصانه خدمت همه کسانی که به‌نوعی مرا در به انجام رساندن این مهم یاری نموده‌اند؛

باشد که این خردترین، بخشی از زحمات آنان را سپاس گوید.

## چکیده

این پژوهش، با هدف بررسی آزمایشگاهی اثر میکرو- نانو حباب‌ها بر بهبود فرآیند تصفیه هوای فاضلاب گرفته شده از تصفیه خانه فاضلاب شهری شاهرود انجام شده است. در مرحله اول روش های تولید و ویژگی های میکرو- نانو حباب ها مورد مطالعه قرار گرفت. آب به وسیله مولد میکرو - نانو حباب ساز ساخته شده توسط شرکت میناب توس غنی از میکرو - نانو حباب شد (مدل TS1-375 به شماره ثبت اختراع ۸۳۹۹۸). برای مقایسه غلظت اکسیژن و دیگر خصوصیات آب غنی شده با میکرو - نانو حباب ها در مقابل هواده سرامیکی معمولی برخی آزمایش های اولیه انجام شد. نتایج نشان داد که ضریب حجمی انتقال اکسیژن در سیستم میکرو - نانو حباب تقریباً ۷ برابر بیشتر از هواده سرامیکی است. دلیل آن می تواند سایز حباب و انحلال گاز در میکرو - نانو حباب ها باشد.

علاوه بر این، نشان داده شد که میکرو - نانو حباب ها پایداری بیشتری از حباب های تولید شده به وسیله هواده سرامیکی دارند. دیگر آزمایشات کیفی انجام شده بر روی فاضلاب تصفیه خانه شاهرود نشان داد که میزان  $BOD_5$ ، COD، TDS، EC و کدورت در فاضلاب تصفیه شده توسط میکرو - نانو حباب ها کمتر از نمونه های سیستم هوادهی سرامیکی است.

لازم به ذکر است که pH در هردو نمونه فاضلاب تقریباً با هم برابر بودند در حالی که pH در نمونه های آب با میکرو - نانو حباب بالاتر از سیستم هوادهی سرامیکی است.

کلمات کلیدی: تصفیه فاضلاب؛ میکرو- نانو حباب؛ نانو سیال؛ ضریب حجمی انتقال اکسیژن؛ اکسیژن خواهی بیولوژیک.

## فهرست عنوان‌ها

|     |                                                    |
|-----|----------------------------------------------------|
| ت   | تقدیم‌نامه.....                                    |
| ث   | سیاس‌گزاری.....                                    |
| ج   | چکیده.....                                         |
| ح   | فهرست عنوان‌ها.....                                |
| ذ   | فهرست شکل‌ها.....                                  |
| ز   | فهرست جدول‌ها.....                                 |
| ۱   | فصل ۱ کلیات.....                                   |
| ۱-۱ | ۱-۱- مقدمه.....                                    |
| ۲   | ۲-۱- بیان مسئله.....                               |
| ۳   | ۳-۱- ضرورت انجام پژوهش.....                        |
| ۴   | ۴-۱- اهداف تحقیق.....                              |
| ۵   | ۵-۱- روش انجام تحقیق.....                          |
| ۵   | ۶-۱- ساختار پایان‌نامه.....                        |
| ۷   | فصل ۲ مبانی تئوریک و مروری بر مطالعات پیشین.....   |
| ۸   | ۱-۲- مقدمه.....                                    |
| ۸   | ۲-۲- تعریف فاضلاب.....                             |
| ۸   | ۳-۲- انواع فاضلاب.....                             |
| ۹   | ۴-۲- اهمیت تصفیه فاضلاب و تاریخچه آن در ایران..... |
| ۱۱  | ۵-۲- روش‌های تصفیه فاضلاب.....                     |
| ۱۲  | ۶-۲- تئوری هوادهی.....                             |
| ۱۳  | ۷-۲- روش‌های معمول هوادهی.....                     |
| ۱۳  | ۲-۷-۱ هوادهی عمقی با دیفیوزر.....                  |
| ۱۴  | ۲-۷-۲ هوادهی سطحی توسط هواده‌های توربینی.....      |
| ۱۶  | ۸-۲- میکرو-نانو حباب‌ها.....                       |
| ۱۶  | ۲-۸-۱ تعریف و ویژگی‌ها.....                        |
| ۲۲  | ۲-۸-۲ روش‌های تولید میکرو حباب‌ها.....             |

|                                                  |    |
|--------------------------------------------------|----|
| ۹-۲- میکرو - نانو حباب در حوزه آب و فاضلاب ..... | ۲۵ |
| ۱۰-۲- جمع بندی .....                             | ۳۰ |

### فصل ۳ مواد و روش ها..... ۳۱

|                                                                       |    |
|-----------------------------------------------------------------------|----|
| ۱-۳- مقدمه .....                                                      | ۳۲ |
| ۲-۳- مواد .....                                                       | ۳۲ |
| ۱-۲-۳- فاضلاب شهری .....                                              | ۳۲ |
| ۳-۳- تجهیزات .....                                                    | ۳۲ |
| ۱-۳-۳- تجهیزات مورد استفاده برای هوادهی .....                         | ۳۲ |
| ۲-۳-۳- دستگاه های مورد استفاده در آزمایش ها .....                     | ۳۳ |
| ۴-۳- روش ها .....                                                     | ۳۳ |
| ۱-۴-۳- مکانیسم هوادهی به وسیله سیستم میکرو - نانو حباب ساز .....      | ۳۳ |
| ۲-۴-۳- اندازه گیری ابعاد حباب های تولید شده .....                     | ۳۴ |
| ۳-۴-۳- پایداری نانو - میکرو حباب های تولید شده .....                  | ۳۴ |
| ۴-۴-۳- اندازه گیری و محاسبه ضریب حجمی انتقال اکسیژن ( $K_L a$ ) ..... | ۳۴ |
| ۵-۴-۳- آزمایش ها مربوط به تأثیر میکرو - نانو حباب ها بر فاضلاب .....  | ۳۶ |
| ۱-۵-۴-۳- نمونه برداری .....                                           | ۳۶ |
| ۲-۵-۴-۳- نگهداری و انتقال نمونه ها .....                              | ۳۷ |

|                                                                                |    |
|--------------------------------------------------------------------------------|----|
| ۳-۵-۴-۳- روند انجام آزمایش ها بر روی فاضلاب در حضور و عدم حضور نانو حباب ..... | ۳۹ |
| ۱-۳-۵-۴-۳- شاخص BOD و اکسیژن محلول .....                                       | ۳۹ |
| ۲-۳-۵-۴-۳- شاخص COD .....                                                      | ۴۱ |
| ۳-۳-۵-۴-۳- پارامترهای دیگر .....                                               | ۴۲ |

### فصل ۴ نتایج و بحث..... ۴۳

|                                                                                                           |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ۱-۴- مقدمه .....                                                                                          | ۴۴ |
| ۲-۴- خصوصیات کیفی فاضلاب شهر شاهرود (و همچنین عملکرد واحدهای مختلف تصفیه خانه) .....                      | ۴۴ |
| ۳-۴- مقدار ضریب انتقال اکسیژن .....                                                                       | ۴۶ |
| ۴-۴- پایداری نانو حباب ها و مقدار اکسیژن محلول در آب هوادهی شده .....                                     | ۴۷ |
| ۵-۴- مقدار اکسیژن محلول (DO) .....                                                                        | ۴۸ |
| ۶-۴- مقدار اکسیژن خواهی بیولوژیک پنج روزه (BOD) در فاضلاب .....                                           | ۵۰ |
| ۷-۴- مقدار اکسیژن خواهی شیمیایی (COD) در فاضلاب .....                                                     | ۵۳ |
| ۱-۷-۴- بررسی تغییرات میزان اکسیژن خواهی شیمیایی در نمونه فاضلاب ورودی، برکه بی هوازی و برکه اختیاری ..... | ۵۳ |

|    |                                                           |
|----|-----------------------------------------------------------|
| ۵۶ | ۴-۷-۲ بررسی تأثیر عامل زمان بر میزان اکسیژن خواهی شیمیایی |
| ۵۸ | ۴-۸- مقدار کل جامدات محلول (TDS)                          |
| ۵۹ | ۴-۹- مقدار هدایت الکتریکی (EC)                            |
| ۶۰ | ۴-۱۰- مقدار کدورت                                         |

## فصل ۵ نتیجه‌گیری و پیشنهادها..... ۶۳

|    |                 |
|----|-----------------|
| ۶۴ | ۵-۱- مقدمه      |
| ۶۴ | ۵-۲- نتیجه‌گیری |
| ۶۷ | ۵-۳- پیشنهادها  |

## منبع‌ها..... ۶۸

## پیوست حلالیت اکسیژن در آب..... ۷۳

## Abstract..... ۸۶

## فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۲: الف) پخش‌کننده و هوادهی عمقی ب) هوادهی سطحی ..... ۱۶
- شکل ۲-۲-۲: شماتیکی از افزایش سطح مشترک با کاهش قطر حباب ..... ۱۸
- شکل ۳-۲: تاثیر اندازه حباب بر سرعت بالا آمدن حباب ..... ۲۰
- شکل ۴-۲: شماتیکی از مولد میکرو حباب نوع فشاری ..... ۲۳
- شکل ۵-۲: شماتیکی از مولد میکرو حباب نوع کاویتاسیون (ونتوری) ..... ۲۴
- شکل ۶-۲: شماتیکی از مولد میکرو حباب نوع جریان چرخشی ..... ۲۵
- شکل ۱-۴: نمودار میزان اکسیژن خواهی بیولوژیک در قسمت های مختلف تصفیه‌خانه فاضلاب شهر شاهرود ..... ۴۵
- شکل ۲-۴: نمودار تغییرات اکسیژن محلول با زمان در حین فعالیت سیستم های هوادهی ..... ۴۶
- شکل ۳-۴: نمودار منحنی تغییرات  $\ln(\frac{1}{1-E})$  نسبت به زمان ..... ۴۷
- شکل ۴-۴: نمودار تفاوت مقداری و پایداری اکسیژن محلول در دو سیستم هوادهی نانو حباب‌ساز و پخش‌کننده سرامیکی ..... ۴۸
- شکل ۵-۴: نمودار مقدار اکسیژن محلول ( $DO$ ) در غلظت های مختلف بلافاصله بعد از آماده سازی ..... ۴۹
- شکل ۶-۴: نمودار مقدار اکسیژن محلول ( $DO$ ) در غلظت های مختلف چهار ساعت پس از آماده سازی ..... ۴۹
- شکل ۷-۴: نمودار مقدار اکسیژن مورد نیاز بیولوژیک ( $BOD$ ) در غلظت با نسبت ۱:۱ ..... ۵۱
- شکل ۸-۴: مقدار اکسیژن مورد نیاز بیولوژیک ( $BOD$ ) در غلظت با نسبت ۱:۱.۲۵ ..... ۵۲
- شکل ۹-۴: نمودار مقدار اکسیژن مورد نیاز بیولوژیک ( $BOD$ ) در غلظت با نسبت ۱:۱.۵ ..... ۵۲
- شکل ۱۰-۴: نمودار تغییرات COD نمونه های حاوی نانو حباب و آماده شده با پخش‌کننده سرامیکی با گذشت زمان برای فاضلاب ورودی (فاضلاب خام) ..... ۵۴
- شکل ۱۱-۴: نمودار تغییرات COD نمونه های حاوی نانو حباب و آماده شده با پخش‌کننده سرامیکی با گذشت زمان برای فاضلاب تهیه شده از برکه بی هوازی ..... ۵۵

- شکل ۴-۱۲ : نمودار تغییرات COD نمونه های حاوی نانو حباب و آماده شده با پخش کننده سرامیکی با گذشت زمان برای نمونه فاضلاب تهیه شده از برکه اختیاری ..... ۵۶
- شکل ۴-۱۳ : نمودار تغییرات اکسیژن خواهی شیمیایی با زمان برای نمونه های حاوی نانو حباب ..... ۵۷
- شکل ۴-۱۴ : نمودار تغییرات اکسیژن خواهی شیمیایی با زمان برای نمونه های آماده شده با سیستم پخش کننده سرامیکی ..... ۵۸
- شکل ۴-۱۵ : نمودار مقایسه سیستم نانو حباب ساز و پخش کننده سرامیکی در مقدار TDS ، ۴ ساعت پس از آماده سازی نمونه ها ..... ۵۹
- شکل ۴-۱۶ : نمودار مقایسه سیستم نانو حباب ساز و پخش کننده سرامیکی در تغییرات (EC) در نسبت های مختلف آب به فاضلاب ..... ۶۰
- شکل ۴-۱۷ : نمودار تغییرات میزان کدورت در نسبت های مختلف آب به فاضلاب ..... ۶۱

## فهرست جدول‌ها

- جدول ۱-۲ : قدرت فاضلاب بر حسب COD، BOD و SS (میلی گرم در لیتر) ..... ۹
- جدول ۲-۲ : مزایا و معایب روش های هوادهی سطحی و عمقی ..... ۱۵
- جدول ۱-۳ : مشخصات عمومی دستگاه های مورد استفاده ..... ۳۳
- جدول ۲-۳ : استاندارد نگهداری و انتقال نمونه جهت انجام آزمایش و اندازه گیری (برگرفته از US-EPA  
2007) ..... ۳۸
- جدول ۱-۴ : خصوصیات کیفی فاضلاب شهری، شهر شاهرود ..... ۴۴



# فصل ۱ کلیات

## ۱-۱- مقدمه

فناوری نانو توانایی طراحی ساختارها را با دقت و ظرافت مولکولی اتمی فراهم می‌آورد. این به معنای مهندسی دقیق یک ساختار در حد میلیاردیم متر یا همان نانومتر است. ساختارهایی که با این دقت تهیه می‌شوند، خصوصیات ویژه و منحصر به فردی از خود نشان می‌دهند. انتظار می‌رود که تا سال ۲۰۵۰ میلادی، این فناوری بتواند چهره زندگی بشر را به‌طور کلی تغییر دهد. فناوری نانو در کنار فناوری زیستی و فناوری اطلاعات موج دیگری از انقلاب صنعتی را در جهان رقم خواهد زد.

## رفع آلودگی آب از طریق تولید حباب

امروزه به دلیل رشد صنعت و جمعیت انسانی و همچنین خطر آلودگی محیط زیست، تصفیه مجدد آب امری اجتناب‌ناپذیر خواهد بود. تأسیسات تصفیه آب طی سال‌ها، پیشرفت قابل‌ملاحظه‌ای پیدا کرده‌اند و بخش‌های مختلفی به فرایند تصفیه آب اضافه شده است. فرایند هوادهی آب‌های آلوده نیز یکی از بخش‌های مهم در عملیات معمول تصفیه آب محسوب می‌شود. تزریق حباب به داخل آب جهت رفع آلودگی در دهه ۱۹۲۰ اجرا شد تا با این روش بتوان آلودگی‌های معلق را به سطح آب آورد و آن‌ها را جداسازی کرد. همچنین این هوادهی می‌تواند به بهبود فعالیت‌های زیستی تصفیه آب و افزایش اکسیژن آب کمک فراوانی کند (فریدی و سروری، ۱۳۹۴).

## ۱-۲- بیان مسئله

آب به‌عنوان درون‌مایه اصلی پیشرفت روزافزون و شتابان صنعت و تکنولوژی و به طبع آن افزایش جمعیت و ارتقای سطح زندگی و شهرنشینی است. اثرات تخریبی پیشرفت صنعت و تکنولوژی و افزایش جمعیت و رشد شهرنشینی که به‌صورت از بین بردن منابع، آلودگی محیط زیست و به‌طور کلی برهم زدن اکوسیستم پدید آمده است، در صورت عدم چاره‌اندیشی می‌تواند نسل حاضر و نسل‌های آینده را دچار مشکلات عدیده‌ای خواهد نمود (یزدان بخش و همکاران، ۱۳۸۶).

یکی از پیامدهای گسترش روزافزون جوامع بشری تولید انواع فاضلاب‌های شهری و صنعتی است. اگر این فاضلاب‌ها بدون تصفیه وارد محیط زیست شوند، آلودگی منابع آب‌های زیرزمینی و سطحی و خاک را در پی

خواهد داشت و به دلیل تخریب محیط زیست و شیوع بیماری‌های گوناگون، صدمات جبران‌ناپذیری بر پیکره توسعه اقتصادی و اجتماعی جوامع وارد می‌نماید؛ بنابراین انسان برای پیشگیری از پیامدهای ورود آلاینده‌های گوناگون از جمله فاضلاب به محیط زیست تصفیه یا حذف آن‌ها را پیش از دفع مطابق با معیارها و استانداردهای تدوین‌شده الزامی نموده است (ایزائلو و همکاران، ۱۳۸۷).

روش‌های مطمئن تصفیه فاضلاب همیشه هدفی مطلوب برای اجتماع است. در دهه‌های گذشته اقدام برای کاهش آلودگی به‌ویژه تصفیه فاضلاب‌های مناطق پرجمعیت شهری از اولویت بالایی برخوردار بوده است (لیلی میقانی، ۱۳۸۰). به موازات این پیشرفت‌ها آنچه دارای اهمیت است بهبود فرآیند، سیستم‌ها و تکنولوژی‌های تصفیه برای مناطق مختلف است.

این پژوهش بر آن است تا به کمک نانو فناوری به بررسی اثرات میکرو- نانو حباب‌ها<sup>۱</sup> در تصفیه فاضلاب شهری بپردازد.

### ۱-۳- ضرورت انجام پژوهش

امروزه حفظ منابع آب، یعنی حیاتی‌ترین ماده‌ای که بشر به آن نیاز دارد به‌طور چشمگیری موردتوجه مجامع مختلف ملی و بین‌المللی قرار گرفته است. برداشتهای بیش‌ازحد از منابع محدود آب از یک‌طرف و آلوده شدن آن‌ها توسط فعالیت‌های مختلف بشر از طرف دیگر همگی دست‌به‌دست هم داده و زنگ خطر بحران آب در سال‌های آینده را به صدا درآورده‌اند (لیلی و همکاران، ۱۳۸۹).

محدودیت منابع آبی مناسب در کشور ایران، ریزش‌های جوی ناکافی و پتانسیل بالای تبخیر، افزایش جمعیت و نیز توسعه صنعتی و اقتصادی اهمیت توجه و حفاظت از منابع آب را به‌صورت ویژه مطرح می‌سازد.

افزایش جمعیت و بهبود زندگی، افزایش سرانه فاضلاب را سبب شده است. با توجه به اینکه از آب‌های پذیرنده جهت دفع فاضلاب و پساب استفاده می‌شود، آلودگی این منابع و سایر منابعی که از این آب‌ها تغذیه

<sup>۱</sup> - micro-nano bubbles

می‌شوند را در پی خواهد داشت. علاوه بر این در صورت عدم تصفیه و رها شدن در محیط باعث شیوع و گسترش اپیدمی‌های بیماری‌های مختلف خواهد شد (موسوی و همکاران، ۱۳۸۸).

استفاده از روش‌های مناسب و کم‌هزینه برای تصفیه فاضلاب‌های خانگی در بسیاری از مناطق متمرکز جمعیتی ایران در حال حاضر به‌عنوان یکی از مسائل فراروی متصدیان صنعت آب و فاضلاب کشور قرار دارد. بررسی و شناخت روشی مناسب که بتواند همراه با امکان دستیابی به اهداف و استانداردهای موجود، از جنبه اقتصادی و فنی موجب کاهش مصرف انرژی و افزایش کیفیت و افزایش سرعت فرآیند تصفیه شود، امری ضروری است.

ضرورت استفاده از روش‌های جدید و پیشرفته تصفیه فاضلاب با کارایی زیاد و هزینه پایین و سرعت عملکردی بالا مانند استفاده از فناوری نانو، امری اجتناب‌ناپذیر است.

#### ۴-۱- اهداف تحقیق

با توجه به مسئله تعریف شده و ضرورت انجام آن، هدف کلی از تحقیق، بررسی آزمایشگاهی اثر میکرو نانو حباب‌ها بر بهبود تصفیه هوازی فاضلاب شهری است. اهداف اصلی این تحقیق را می‌توان در موارد زیر خلاصه کرد.

۱. بررسی اثر میکرو نانو حباب‌ها بر شاخص اکسیژن خواهی بیولوژیکی<sup>۱</sup> پنج‌روزه در فاضلاب شهری
۲. بررسی اثر میکرو-نانو حباب‌ها بر شاخص اکسیژن خواهی شیمیایی<sup>۲</sup> در فاضلاب شهری
۳. بررسی پایداری میکرو-نانو حباب‌ها در آب تمیز
۴. محاسبه ضریب حجمی انتقال اکسیژن<sup>۳</sup> مولد نانو حباب‌ساز در آب تمیز
۵. بررسی اثر میکرو-نانو حباب‌ها بر پارامترهایی همچون هدایت الکتریکی<sup>۴</sup>، کل جامدات محلول<sup>۵</sup>، کدورت<sup>۱</sup> و

pH

<sup>۱</sup>- Biochemical Oxygen Demand

<sup>۲</sup>- Chemical Oxygen Demand

<sup>۳</sup>- Volumetric Oxygen Transfer Coefficient

<sup>۴</sup>- Electrical Conductivity

<sup>۵</sup>- Total Dissolved Solids

## ۱-۵- روش انجام تحقیق

به منظور بررسی آزمایشگاهی میکرو- نانو حباب‌ها بر بهبود تصفیه هوای فاضلاب شهری و شناخت برتری سیستم نانو حباب‌ها، مقایسه سیستم نانو حباب‌ساز با سیستم پخش کننده سرامیکی منفذ ریز صورت پذیرفت. در ابتدا ضریب انتقال اکسیژن در دو سیستم هوادهی محاسبه گردید و مورد مقایسه قرار گرفتند و پس از آن پایداری میکرو نانو حباب‌ها در مقایسه با حباب‌های معمولی با روند تغییرات میزان اکسیژن محلول در آب تمیز انجام شد.

در ادامه اثر میکرو نانو حباب‌ها بر روی فاضلاب شهری با اندازه‌گیری پارامترهای  $BOD^2$ ،  $COD^3$ ، pH،  $TDS^4$  و  $EC^5$  و کدورت مورد بررسی قرار گرفت.

## ۱-۶- ساختار پایان نامه

این پایان نامه شامل پنج فصل است:

در فصل اول به بیان کلیاتی از تحقیق پرداخته می‌شود که شامل: مقدمه، بیان مسئله، ضرورت انجام آن، اهداف تحقیق و روش انجام آن است.

در فصل دوم با عنوان مبانی تئوریک و مروری بر مطالعات پیشین، در ابتدا کلیاتی در مورد فاضلاب و انواع روش‌های تصفیه فاضلاب بیان شده، سپس تئوری هوادهی و انواع روش‌های هوادهی توضیح داده شده است و پس از آن ویژگی‌های میکرو حباب و نانو حباب‌ها بیان و سیستم میکرو حباب و نانو حباب به عنوان روشی نوین برای هوادهی فاضلاب پیشنهاد گشته است.

در پایان همین فصل مطالعات انجام شده محققین در رابطه با کاربرد میکرو حباب‌ها در صنعت آب و فاضلاب آمده است.

---

۱- Turbidity

۲- Biochemical Oxygen Demand

۳- Chemical Oxygen Demand

۴- Total Dissolved Solids

۵- Electrical Conductivity

فصل سوم به دو بخش اصلی با عنوان "مواد و روش‌ها" تقسیم شده است. در بخش مواد، مواد و تجهیزات استفاده‌شده در این تحقیق معرفی شده‌اند و در بخش روش‌ها، مکانیسم هوادهی به‌وسیله سیستم نانو حباب‌ساز، اندازه‌گیری ابعاد حباب‌های تولیدشده و روش محاسبه ضریب انتقال اکسیژن آمده است. در ادامه این بخش آزمایش‌ها مربوط به پایداری میکرو-نانوحباب‌ها در آب تمیز و همچنین آزمایش‌ها مربوط به اثر میکرو نانوحباب‌ها در فاضلاب شهری بیان شده است.

در فصل چهارم نتایج حاصل از محاسبات و اندازه‌گیری‌های انجام‌شده، ارائه شده و همچنین نتایج به‌دست‌آمده مورد تحلیل و ارزیابی قرار گرفته‌اند.

در فصل پنجم خلاصه نتایج حاصل از تحقیق بر اساس اهداف تعیین‌شده ارائه گردیده است و پیشنهادهایی به‌منظور توسعه و پیشرفت این پژوهش بیان شده است.

## فصل ۲ مبانی تئوریک و مروری بر مطالعات پیشین

## ۲-۱- مقدمه

در این بخش در ابتدا به معرفی فاضلاب و انواع فاضلاب پرداخته می‌شود و پس از آن اهمیت تصفیه و تاریخچه تصفیه در ایران و انواع روش‌های تصفیه فاضلاب بیان می‌شود. پس از آن به بیان تئوری هواده‌ی، انواع هواده‌ی‌ها و معرفی سیستم میکرو نانو حباب به عنوان سیستم نوین هواده‌ی پرداخته شد. در پایان ضمن بیان اصول و ویژگی‌های میکرو حباب و نانو حباب‌ها، مطالعات انجام شده محققان بیان می‌شود.

## ۲-۲- تعریف فاضلاب

در بیان ساده می‌توان گفت که فاضلاب، آب استفاده شده یا برجای مانده از فعالیت‌های گوناگون است که در طی فرآیندهای یادشده، پارامترهای کیفی آن به سطح کمتر از استاندارد نزول کرده است. در اصطلاح فنی، فاضلاب به هر نوع آب یا مایعی که حاوی غلظت بالایی از ناخالصی‌ها و یا مواد آلاینده به شکل جامد، مایع، گاز و یا ترکیبی از این سه باشد اطلاق می‌شود که تخلیه مستقیم آن به محیط زیست زیان‌آور است (علوی مقدم و صدری مقدم، ۱۳۹۲).

## ۲-۳- انواع فاضلاب

منشأ تولید فاضلاب بر اساس فعالیت‌های انسان می‌تواند فاضلاب خانگی، صنعتی، کشاورزی یا ترکیبی از آن‌ها باشد. از نظر خصوصیات فیزیکی، شیمیایی بیولوژیکی و قدرت آلاینده‌ی در چهار حالت ضعیف، متوسط، قوی و خیلی قوی هستند (ابراهیمی، ۱۳۹۴؛ رحیمی و همکاران، ۱۳۸۸).

هرچه مقدار مواد آلی در فاضلاب بیشتر باشد، فاضلاب غلیظ‌تر است. غلظت فاضلاب اغلب به وسیله سه پارامتر میزان اکسیژن خواهی بیولوژیک (BOD)، میزان اکسیژن خواهی شیمیایی (COD) و جامدات معلق ( $SS^1$ ) سنجیده می‌شود (رحیمی و همکاران، ۱۳۸۸).

غلظت فاضلاب یک اجتماع به میزان خیلی زیادی تحت تأثیر میزان و نحوه مصرف آب در آن اجتماع است. به طور معمول در شرایط یکسان نوع فاضلاب هرچه میزان مصرف آب در جامعه کمتر باشد غلظت آلودگی

---

<sup>۱</sup> - Suspended Solids

فاضلاب بیشتر خواهد بود و فاضلاب قوی تر است و بلعکس هرچه میزان مصرف آب در همان جامعه بیشتر باشد فاضلاب ضعیف تر خواهد بود.

جدول ۱-۲: قدرت فاضلاب برحسب COD، BOD و SS (میلی گرم در لیتر)

| قدرت (درجه) | SS    | COD    | BOD   |
|-------------|-------|--------|-------|
| ضعیف        | < ۱۰۰ | < ۴۰۰  | < ۲۰۰ |
| متوسط       | ۳۰۰   | ۷۰۰    | ۳۵۰   |
| قوی         | ۵۵۰   | ۱۰۰۰   | ۵۰۰   |
| خیلی قوی    | > ۵۵۰ | > ۱۰۰۰ | > ۵۰۰ |

## ۲-۴- اهمیت تصفیه فاضلاب و تاریخچه آن در ایران

علیرغم امتیازات گسترده‌ای که توسعه شهرنشینی و به موازات آن پیشرفت صنایع و کشاورزی برای جوامع مختلف بشری به ارمغان آورده است، مشکلاتی را نیز به همراه داشته است که از آن جمله می‌توان به تولید مقادیر قابل توجهی از فاضلاب‌های شهری و صنعتی اشاره کرد. تخلیه این فاضلاب‌ها بدون تصفیه مناسب می‌تواند منجر به آلودگی شدید منابع آب شود. با توجه به محدود بودن منابع تجدید پذیر آب در جهان، ضرورت توجه به مسئله آلودگی فاضلاب‌های مختلف و لزوم تحقیق پیرامون روش‌های بهینه تصفیه، بیش‌ازپیش احساس می‌شود (علوی مقدم و صدری مقدم، ۱۳۹۲).

معمولاً فاضلاب شامل ۹۹.۹٪ آب و ۰.۱٪ جامدات است. ناپایدار سازی آلاینده‌های موجود در فاضلاب و جداسازی آن‌ها اساس تصفیه فاضلاب را تشکیل می‌دهد (محو و همکاران، ۱۳۹۴؛ ایزانلو و همکاران، ۱۳۸۷).

تصفیه فاضلاب قبل از ورود به محیط‌زیست دلایل متعددی دارد که اهم آن‌ها عبارت‌اند:

(الف) انتشار بیماری‌های واگیر ناشی از آلودگی‌های فاضلاب و تأمین بهداشت عمومی،

(ب) حفظ منابع آب، از طریق پیشگیری از آلودگی آب‌های سطحی و زیرزمینی و در صورت امکان استفاده

مجدد از بخش عظیمی از آب مصرف‌شده برای مصارف خاص نظیر فعالیت‌های کشاورزی و پرورش آبزیان،

(ج) حفظ محیط‌زیست (ندافی و نبی زاده، ۱۳۷۵).

برای موفقیت یک سامانه تصفیه فاضلاب رعایت نکات زیر توصیه می‌شود

(الف) تثبیت مواد آلی،

(ب) طراحی فرآیند تصفیه برای تولید پساب قابل تخلیه به محیط‌زیست،

(ج) فراهم آمدن امکان استفاده مجدد از آب و مواد جامد ناشی از تصفیه فاضلاب تا حد امکان (رحیمی و

همکاران، ۱۳۸۸).

کشور ایران با مساحت بیش از ۱۶۴۸۰۰ کیلومتر مربع به‌عنوان هجدهمین کشور وسیع دنیا، تنها ۰.۳۴ درصد

از آب‌های موجود در کل خشکی‌های جهان را در اختیار دارد. بنا بر تقسیم‌بندی اراضی جغرافیایی، بیش از

۸۲ درصد از مساحت کشور ایران در منطقه خشک و نیمه‌خشک قرار دارد. به‌طوری‌که متوسط بارندگی

سالانه در کشور حدود ۲۵۰ میلی‌متر بوده که کمتر از یک‌سوم متوسط بارش در دنیا (۸۶۰ میلی‌متر) است

(ابراهیمی، ۱۳۹۴).

همین امر موجب شده که ایران به‌عنوان یکی از کشورهای خاورمیانه با کاهش شدید منابع آب تجدیدشونده

مواجه باشد.

تاریخچه تصفیه فاضلاب به شیوه امروزی به اواخر قرن نوزدهم و اوایل قرن بیستم برمی‌گردد. در ایران اولین

تصفیه‌خانه شهری در سال ۱۳۴۰ شمسی و به روش لجن فعال و با ظرفیت ۴۸۰ مترمکعب در روز در منطقه

صاحبقرانیه تهران ساخته شد. بر اساس آمار در سال ۱۳۸۸، از حدود هزار شهر کشور ۱۰۱ شهر، سامانه

جمع‌آوری و تصفیه فاضلاب اجرا شده و در مرحله بهره‌برداری است و در ۱۱۲ شهر دیگر نیز شبکه

جمع‌آوری و تصفیه فاضلاب در دست اجرا و در ۲۰۱ شهر دیگر طرح‌های مطالعاتی لازم تهیه و آماده اجرا

است. بر این اساس حدود ۳۰ درصد از جمعیت شهری تحت پوشش سامانه‌های جمع‌آوری و تصفیه فاضلاب

قرار دارد (ابراهیمی، ۱۳۹۴).

## ۲-۵- روش‌های تصفیه فاضلاب

فاضلاب‌ها بر اساس سه روش فیزیکی، شیمیایی و زیستی تصفیه می‌شوند. به روش‌هایی از تصفیه که بر مبنای قوانین فیزیکی انجام می‌شوند، واحدهای عملیاتی و به روش‌هایی که عمل حذف آلاینده‌ها از طریق واکنش‌های شیمیایی یا زیستی صورت می‌گیرد، واحدهای فرآیندی می‌گویند (ابریشم چی و افشار، ۱۳۸۵). تصفیه فیزیکی:

تصفیه فیزیکی و مکانیکی از یک رشته عملیاتی تشکیل شده است که در آن‌ها تنها از خواص مکانیکی و فیزیکی برای جداسازی مواد در تصفیه فیزیکی با استفاده از خواص فیزیکی و مکانیکی برای جداسازی مواد معلق در فاضلاب استفاده می‌شود. مهم‌ترین روش‌های فیزیکی متداول عبارت‌اند از: فیلتراسیون، ته‌نشینی، شناورسازی (جداسازی از سطح فاضلاب) (منزوی، ۱۳۸۵).

تصفیه شیمیایی: در حقیقت اساس کار تصفیه شیمیایی بر کاربرد مواد شیمیایی در تصفیه فاضلاب است. در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب مواد شیمیایی مانند کلروفریک و انواع مختلف پلیمرها برای تأثیرگذاری بر روی مواد نامحلول و کلوئیدی در فاضلاب به کار می‌روند. به‌جز این موارد، از مواد شیمیایی مانند کلر برای گندزدایی و کاهش بوی نامطبوع فاضلاب استفاده می‌شود (منزوی، ۱۳۸۵).

اکسیداسیون شیمیایی برای تصفیه فاضلاب‌هایی که دارای مواد آلی تجزیه‌ناشدنی زیستی یا مواد سمی‌اند، به کار می‌رود. از عوامل اکسیدکننده‌ای چون کلرین، ازن، پرمنگنات پتاسیم و هیدروکسید کلسیم برای تصفیه فاضلاب استفاده می‌شود. درواقع اغلب پروسه‌ها بر اساس واکنش مستقیم ماده اکسیدکننده با آلاینده‌ها یا همراه رادیکال‌های هیدروکسیل ایجادشده عمل می‌کنند (Renou et al., 2008).

تصفیه زیستی: تصفیه زیستی یکی از بهترین گزینه‌ها برای حذف مواد آلی از فاضلاب است. عملکرد تصفیه زیستی درواقع همان عملی است که در طبیعت به‌صورت خودبه‌خودی رخ می‌دهد. در این سیستم‌ها از میکروارگانیسم‌های هوازی و بی‌هوازی برای تصفیه مواد آلی استفاده می‌شود با این تفاوت که مدت زمان تصفیه‌ای را که در طبیعت ممکن است به چند روز برسد، به چندین ساعت با فناوری‌های انسان‌ساخت تقلیل می‌دهند (مهردادی و همکاران، ۱۳۹۱). در تصفیه بیولوژیک فاضلاب، باکتری‌ها با استفاده از اکسیژن، مواد آلی موجود در فاضلاب را مصرف می‌کنند. که معادله کلی به‌صورت زیر است

باکتری‌های جدید + فاضلاب تصفیه‌شده  $\longrightarrow$  اکسیژن + باکتری + فاضلاب

فرآیندهای تصفیه زیستی بر اساس نوع باکتری آن و شرایط حاکم بر آن به‌صورت هوازی و بی‌هوازی است (ایزانلو و همکاران، ۱۳۸۷). تصفیه زیستی هوازی در حضور میکروارگانیسم‌های هوازی رشد یافته در محیط حاوی اکسیژن انجام می‌گیرد و اکسیژن ملکولی نقش گیرنده الکترون را بازی می‌کند. ثابت‌شده است که این فرآیند بازدهی مناسبی در حذف مواد آلی فاضلاب را دارد، ولی از آنجاکه نیازمند تأمین اکسیژن به‌صورت مصنوعی هستند، هزینه‌های راهبری و نگهداری آن نسبت به فرآیندهای بی‌هوازی بیشتر است.

در حوضچه هوادهی میکروارگانیسم با دریافت اکسیژن به مقدار کافی، مواد آلی و ناپایدار فاضلاب را تجزیه نموده و به مواد پایدار و فسادناپذیر (ترکیبات معدنی) تبدیل می‌نماید (موسوی و همکاران، ۱۳۸۸؛ رحیمی و همکاران، ۱۳۸۸).

## ۲-۶- تئوری هوادهی

هوادهی یک فرآیند انتقال جرم گاز - مایع است که نیرو محرکه در فاز گاز، فشار جزیی گاز  $P_g$  و در فاز مایع گرادیان غلظت  $(C_s - C)$  است، غلظت معادل مقدار اشباع  $C_s$  در لایه مشترک گاز - مایع و مقدار کمتر،  $C$ ، در توده مایع است. سرعت تغییر غلظت تابعی از این نیرو محرکه است.

$$\frac{dc}{dt} = \phi(P_g) = \phi(C_s - C) \quad [۱-۲]$$

برای گازهایی که به مقدار جزیی محلول‌اند، مانند  $O_2$  و  $CO_2$  حالتی که در بیشتر فرآیندهای تصفیه فاضلاب وجود دارد، این فاز مایع است که بر فرآیند انتقال حکم فرم است.

$$\frac{dc}{dt} = K_L \cdot a (C_s - C) \quad [۲-۲]$$

که  $K_L$  ضریب لایه مایع است که از رابطه [۲-۳] قابل محاسبه است.

$$K_L = \frac{D}{Y} \quad [۳-۲]$$

در معادله [۳-۲]، ضریب انتشار مایع  $D$  است که واحد آن  $(\frac{cm}{h})$  است و  $Y$  ضخامت لایه و واحد آن برحسب  $cm$  است.

$a$  = سطح بینابینی برای انتقال در واحد حجم

[۴-۲]

$$a = \frac{\text{سطح } A}{\text{حجم } V}$$

مقدار  $a$  با تشکیل حباب (قطره) ریزتر افزایش می‌یابد؛ نابراین انتقال گاز را افزایش می‌دهد. از آنجاکه عملاً اندازه‌گیری این سطح ممکن نیست لذا ضریب کلی  $K_L a$  با آزمایش تعیین می‌گردد (موسوی و همکاران، ۱۳۸۸؛ ابریشم چی و افشار، ۱۳۸۵).

### عوامل مؤثر بر انتقال اکسیژن

چند عامل بر کار هواده‌ها اثر می‌گذارد که عبارت‌اند از:

- حرارت
- غلظت اکسیژن محلول
- مشخصات هواده
- مشخصات فاضلاب

### ۲-۷- روش‌های معمول هواده‌ی

عمل تماس فاضلاب با هوا به‌طور کلی به دو صورت هواده‌ی عمقی با دیفیوزر و هواده‌ی سطحی توسط هواده‌های توربینی انجام می‌پذیرد که در ادامه به‌اختصار معرفی می‌گردند؛

#### ۲-۷-۱ هواده‌ی عمقی با دیفیوزر

در این روش، دمیدن هوا به درون فاضلاب با کمک دمنده یا کمپرسور و توسط لوله‌های تحت فشار انجام می‌گیرد. چون لوله‌های تخلیه هوا به داخل حوضچه فاضلاب در کف حوضچه قرار دارد، به این عمل هواده‌ی عمقی می‌گویند. تجهیزات اصلی مورد استفاده در هوا رسانی به فاضلاب در این روش شامل دمنده‌های هوا (Air Blowers)، سامانه توزیع هوا، انتقال هوا و در نهایت پخش حباب‌های هوا توسط ریز پخش‌کننده‌های حباب دیسکی یا لوله‌ای (با غشاء ممبرانی) است. در این روش هواده‌ی، هوای

فشرده‌شده توسط دمنده‌ها با فشار زیاد از طریق لوله‌های رابط که تقریباً در فاصله ۲۰ تا ۳۰ سانتیمتری کف حوضچه هوادهی قرار دارند می‌رسند و از آنجا به درون فاضلاب تزریق می‌گردد. کار پخش‌کننده‌ها توزیع یکنواخت هوا به شکل حباب‌های ریز هوا است که ضمن تماس با فاضلاب، مسیر خود را به سمت سطح مایع طی می‌نمایند. در طی مسیر قسمتی از اکسیژن هوا در فاضلاب حل می‌گردد که از این طریق اکسیژن موردنیاز میکروارگانیسم‌ها تأمین می‌شود (ابریشم چی و همکاران، ۱۳۸۵؛ ترکیان و جعفر زاده، ۱۳۸۰؛ ترکیان و احمدی ۱۳۸۵).

#### ۲-۷-۲ هوادهی سطحی توسط هوادهای توربینی

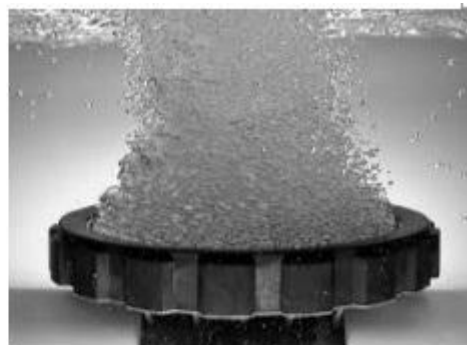
روش دیگر هوادهی به فاضلاب استفاده از هوادهای سطحی است. در این سیستم با بر هم زدن، ایجاد تلاطم، اختلاط، پخش کردن و پاشیدن قطرات فاضلاب به هوا، سطح تماس آن با هوا افزایش یافته و فاضلاب هوادهی می‌شود. در این روش هوادهای خارج از مایع حوضچه هستند و فقط همزن آن‌ها در عمق معینی از سطح فاضلاب قرار می‌گیرد. هوادهای فاضلاب را به شدت به هم می‌زنند تا از ته‌نشین شدن مواد معلق جلوگیری به عمل آورده و همچنین سطح تماس مایع مخلوط را با هوا را افزایش دهند. از این طریق اکسیژن موردنیاز میکروارگانیسم‌ها تأمین می‌شود.

هریک از دو روش معایب و مزایای خاص خود را دارند. مهم‌ترین خصوصیات این روش‌ها در جدول ۲-۲ آورده شده است.

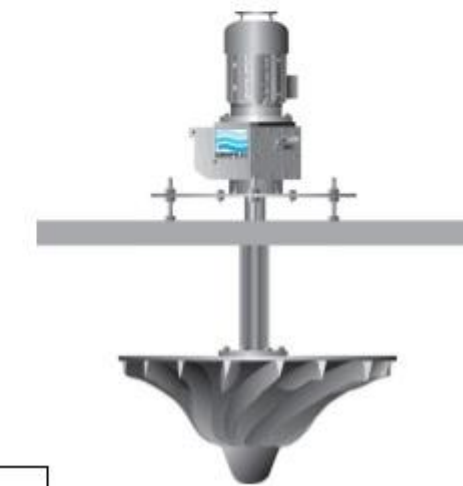
جدول ۲-۲: مزایا و معایب روش‌های هوادهی سطحی و عمقی

| هوادهی سطحی                                                                                                                                                            | هوادهی عمقی                                                                                                                                          |       |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| <p>سادگی عمل راهبری</p> <p>نیاز به تعمیر کمتر نسبت به سیستم‌های</p> <p>هوادهی عمقی و نگهداری کم‌هزینه‌تر</p> <p>هزینه اولیه پایین‌تر</p>                               | <p>سرعت بالای جذب و انتقال اکسیژن</p> <p>افت فشار پایین</p> <p>کارایی و راندمان بالا</p> <p>مقاومت بالا در برابر دما و خوردگی</p>                    | مزایا |
| <p>راندمان پایین سیستم در مقایسه با سیستم</p> <p>هوادهی عمقی</p> <p>انتقال و جذب اکسیژن کم</p> <p>عملکرد پایین سیستم در مناطق سردسیر به</p> <p>دلیل احتمال یخ‌زدگی</p> | <p>هزینه اولیه بالا</p> <p>نگهداری و راهبری سخت</p> <p>نیاز به تعمیرات و نگهداری بیشتر</p> <p>از کار افتادگی و گرفتگی زیاد منافذ خروج</p> <p>هوا</p> | معایب |

در شکل ۱-۲ تصویری از یک سیستم هوادهی سطحی و عمقی نشان داده شده است.



الف



ب

شکل ۱-۲: الف) پخش کننده و هوادهی عمقی ب) هوادهی سطحی

## ۲-۸- میکرو-نانو حبابها

### ۲-۸-۱ تعریف و ویژگیها

میکرو حبابها<sup>۱</sup> (MBs) و نانوحبابها (NBs<sup>۲</sup>) حبابهای ریزی هستند که قطر آنها به ترتیب ۱۰ تا ۵۰ میکرومتر و کمتر از ۲۰۰ نانومتر است (Agarwal et al., 2011; Li and Tsuge, 2006).  
 با این وجود توافقی بر سر محدوده دقیق اندازه تعریف شده برای میکرو حبابها و نانوحبابها وجود ندارد (Li and Tsuge, 2006). بلکه بر اساس نوع کاربرد تعاریف متفاوتی برای میکرو حبابها و نانو حبابها ارائه شده است. به عنوان مثال میکرو حباب در مطالعات فیزیولوژیکی موجودات زنده، به حبابهایی با قطری در

1 - Micro bubbles

2 - Nano bubbles

محدوده ۴۰-۱۰ میکرومتر اطلاق می‌شود درحالی‌که در مهندسی مکانیک این حباب‌ها قطری در محدوده ۵۰۰-۱۰۰۰ میکرومتر دارند.

در مقایسه با میلی حباب‌ها که قطر آن‌ها چندین میلی‌متر است، میکرو حباب‌ها و نانو حباب‌ها دارای ویژگی‌های متفاوتی هستند که می‌تواند ناشی از اندازه کوچک آن‌ها باشد. از ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی میکرو حباب‌ها و نانوحباب‌ها می‌توان به سطح ویژه زیاد (نسبت سطح کل به حجم یا وزن توده)، فشار درونی زیاد گازها در این حباب‌ها اشاره کرد که می‌تواند دلیلی بر ظرفیت بالای انحلال گاز این حباب‌ها در محلول پایه باشد. ثابت‌شده است که میکرو حباب‌ها و نانوحباب‌ها دارای سطح باردار هستند و در اثر اضمحلال میکرو حباب‌ها رادیکال‌های آزاد تولید می‌شوند. با توجه به ویژگی‌های دینامیکی و فیزیکی سیالات، سرعت بالا آمدن دارای سرعت بالا آمدن این حباب‌ها در سیال پایه بسیار کم است. همچنین شایان ذکر است که میکرو نانو حباب‌ها مقاومت اصطکاکی را کاهش می‌دهند (Tsuge, 2014).

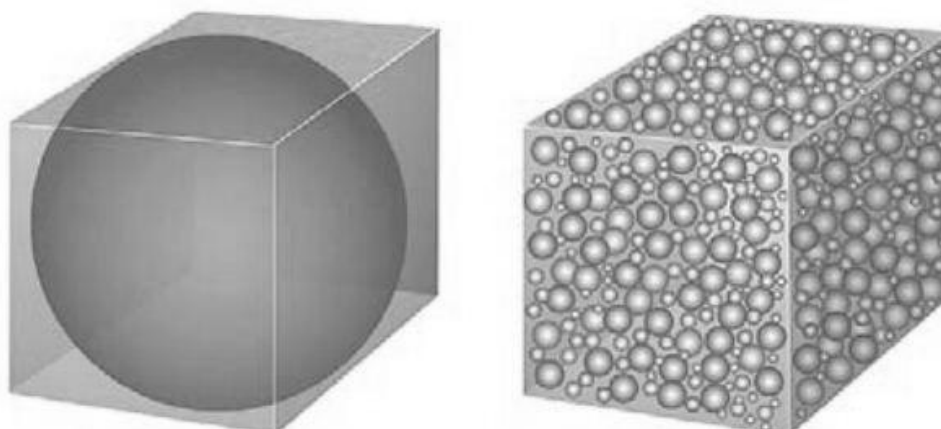
### ۱- سطح مشترک زیاد

میکرو حباب‌ها و نانوحباب‌ها دارای سطح ویژه بالایی هستند. سطح مشترک  $a$ ، نسبت سطح رویی حباب‌ها به واحد حجم تعریف می‌شود که برای حباب‌های کروی به قطر  $d_b$  عبارت است از

$$a = \frac{\text{سطح } A}{\text{حجم } V} \quad [۴-۲ \text{ تکرار}]$$

$$a = \frac{\pi d_b^2}{\left(\frac{1}{6}\right) \pi d_b^3} = \frac{6}{d_b} \quad [۵-۲]$$

از آنجاکه سطح ویژه رابطه عکس با قطر حباب دارد، با کاهش قطر حباب سطح ویژه آن افزایش می‌یابد.



شکل ۲-۲-۲: شماتیکی از افزایش سطح مشترک با کاهش قطر حباب

به عنوان مثال در حجم مشخص یک لیتر آب، تعداد  $1.9 \times 10^5$  میلی حباب با قطر یک میلی متر قرار می گیرد و سطح ویژه آن دست به  $6 \times 10^2 (\text{m}^{-1})$  می آید این در حالی است که برای حباب های ۱۰ میکرومتری تعداد حباب ها  $10^6$  و سطح ویژه آن ها به  $6 \times 10^4 (\text{m}^{-1})$  افزایش خواهد یافت (Li et al., 2006).

با افزایش سطح، امکان تبادل گاز بین فازهای گاز - مایع افزایش یافته و لذا عملکرد تبادل کلی سیال بهبود می یابد.

## ۲- فشار داخلی زیاد

اختلاف فشار داخلی و بیرونی میکرو- نانو حباب ها خیلی زیاد است. فشار گاز درون یک حباب بزرگ تر از فشار بیرون آن است که این ناشی از کشش سطحی است. فشار داخلی حباب ها از معادله یانگ- لاپلاس محاسبه می شود (Atkins and de Paula, 2006).

$$p_g = P_L + \frac{4\sigma}{d_b} \quad [۶-۲]$$

که در آن  $P_g$  و  $P_L$  به ترتیب فشار گاز و فشار مایع (Pa)،  $\sigma$  کشش سطحی ( $N.m^{-1}$ ) و  $d_b$  شعاع حباب (m) است. با توجه به معادله ۲-۲ می‌توان مشاهده کرد که فشار داخلی حباب‌ها با قطر آن رابطه عکس دارد. به‌عنوان مثال یک ماکرو حباب به قطر یک میلی‌متر، فشار داخلی ۰/۱۰۲ مگا پاسکال در آب دارد، درحالی‌که یک میکرو حباب به قطر ۱۰ میکرومتر فشار داخلی ۰/۱۳۰ مگا پاسکال دارد (Millero, 2001). میزان کشش سطحی  $\sigma = 0.072785$  فرض شده است.

### ۳- سرعت بالا آمدن آهسته

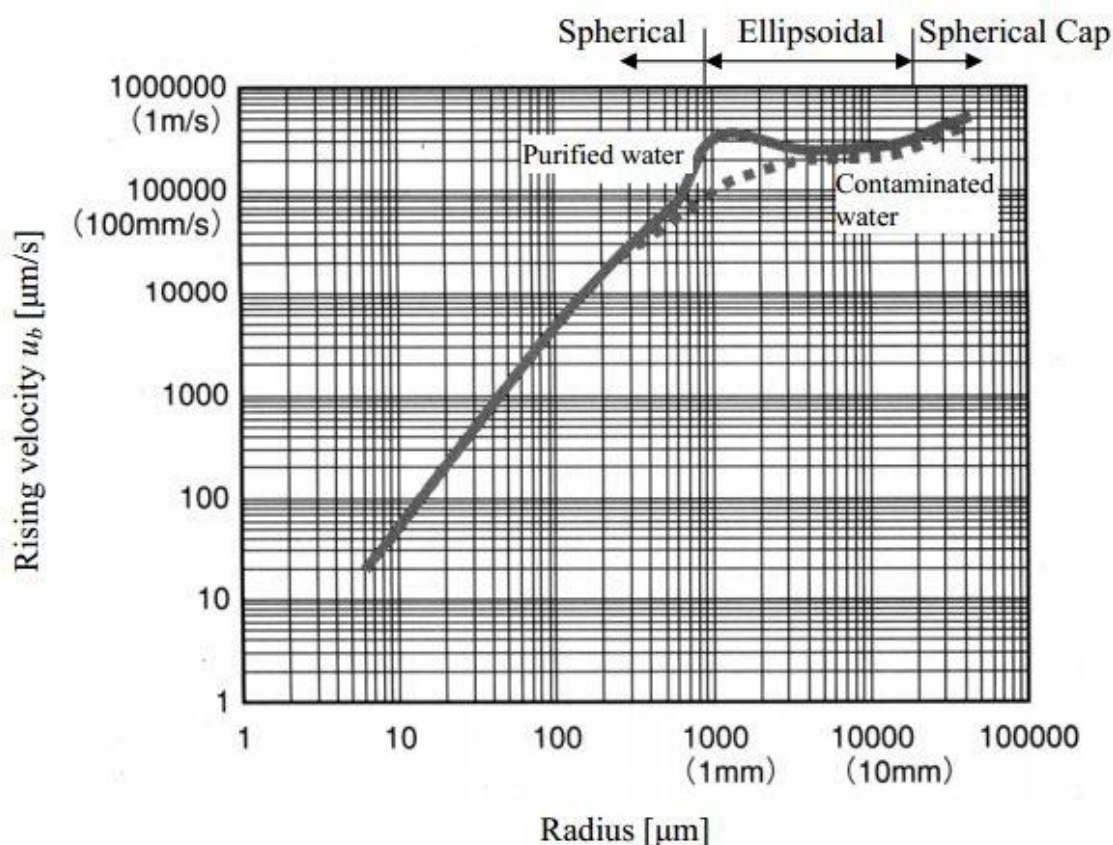
سرعت بالا آمدن نهایی میکرو حباب‌ها و نانوحباب‌ها بسیار کند است. حباب پس از شکل‌گیری، به سرعت حد بالا آمدن می‌رسد (Li et al., 2009). چنانچه برای حباب‌های کوچک کروی اندازه سرعت نهایی با استفاده از قانون استوک ۲ قابل محاسبه باشد (Clift et al., 2005).

$$u_b = \frac{\rho g d_b^2}{18\mu} \quad [7-2]$$

که در آن  $\rho$  چگالی مایع [ $kg/m^3$ ،  $g$  شتاب گرانش [ $m/s^2$ ،  $\mu$  ویسکوزیته مایع [Pa.s] و  $d_b$  قطر حباب [m] است. قانون استوک فقط برای حباب‌های کوچک با سطح ثابت قابل استفاده است. برای مواردی که حباب‌ها دارای سطح متحرک باشند از معادله Hadamard-Rybczynski استفاده می‌شود.

$$u_b = \frac{\rho g d_b^2}{12\mu} \quad [8-2]$$

نموداری از تغییر سرعت بالا آمدن با شعاع حباب در آب خالص و آب آلوده در شکل (۲-۳) نشان داده شده است.



شکل ۲-۳: تأثیر اندازه حباب بر سرعت بالا آمدن حباب

این مطالب برای حباب‌هایی در محدوده بزرگ‌تر از ۸ میکرومتر صادق است. نانو حباب‌ها بالا نمی‌آیند زیرا اختلاف وزن کره به اطراف قادر به غلبه بر نیروی کشش سطحی سیال پایه نیست. همچنین از رفتار نیوتونی سیالات در محدوده نانو متری اطلاع دقیق در دست نیست (Takamura, 2004).

#### ۴- سطح باردار منفی

از طریق اندازه‌گیری پتانسیل زتا، سطح میکرو حباب‌ها و نانو حباب‌ها در گستره وسیعی از مقادیر pH دارای بار منفی هستند. در مطالعه انجام‌شده، به اهمیت یون‌های  $\text{OH}^-$  و  $\text{H}^+$  در بار سطح مشترک گاز-مایع تأکید شده است (Takahashi, 2005).

#### ۵- انحلال زیاد گاز و نرخ بالای انقباض

به دلیل فشار زیاد گاز داخل حباب‌ها، انحلال گاز در مایع پیرامونی افزایش می‌یابد؛ که این امر موجب کوچک شدن حباب می‌شود. از آنجاکه با کاهش قطر حباب، فشار داخلی آن افزایش می‌یابد و با افزایش فشار

داخلی، انحلال گاز در مایع افزایش می‌یابد بنابراین میکرو حباب‌ها نرخ کوچک شدن بیشتری نسبت به حباب‌های ماکرو دارند (Tsuge, 2014).

#### ۶- کاهش مقاومت اصطکاکی

مسئله کاهش نیروی مقاوم در برابر حرکت اجسام داخل یک سیال و در نتیجه امکان دستیابی به سرعت‌های بالاتر و نیز کاهش مصرف سوخت، منابع موردنیاز انرژی برای حرکت جسم از دیرباز موردتوجه محققان بوده است.

مقاومت در مقابل حرکت اجسام شناور به شکل‌های مختلفی وجود دارد و دسته‌بندی می‌شود؛ اما در یک سیال تراکم ناپذیر نظیر آب، مقاومت سیال در برابر حرکت، عبارت است از مقاومت موجی، مقاومت فشار و مقاومت اصطکاک پوسته‌ای، بیشترین نیروی مقاوم در مقابل حرکت شناورها مربوط به مقاومت اصطکاکی پوسته‌ای است که ناشی از لزجت است.

یکی از روش‌های مناسب در کاهش اصطکاک پوسته‌ای، تزریق میکرو حباب‌ها و نانو حباب‌ها (حباب‌های ریز هوا) به داخل لایه مرزی روی یک جسم جامد است (نوری و همکاران، ۱۳۸۶).

مکانیزم کاهش اصطکاک پوسته‌ای به‌وسیله میکرو حباب‌ها و نانو حباب‌ها هنوز به‌صورت کامل و جامعی موردبررسی قرار نگرفته است. یک توضیح ساده برای بیان این پدیده آن است که افزایش لزجت مؤثر به‌وسیله میکرو حباب‌ها باعث کاهش اثر تنش رینولدز می‌شود و درنتیجه باعث تغییر پروفیل سرعت و کاهش گرادیان سرعت در دیواره می‌شود. نمونه دیگر چنین شرحی، تغییر اندازه لایه مرزی با ایجاد شرایط نزدیک به جریان آرام در جریان و به‌عبارت‌دیگر بهبود شرایط و مشخصه‌های دیگر جریان آشفته است (Serizawa et al., 2003). با این حال هنوز ایده و نظری قطعی و نهایی برای این پدیده از سوی محققان اعلام نشده است.

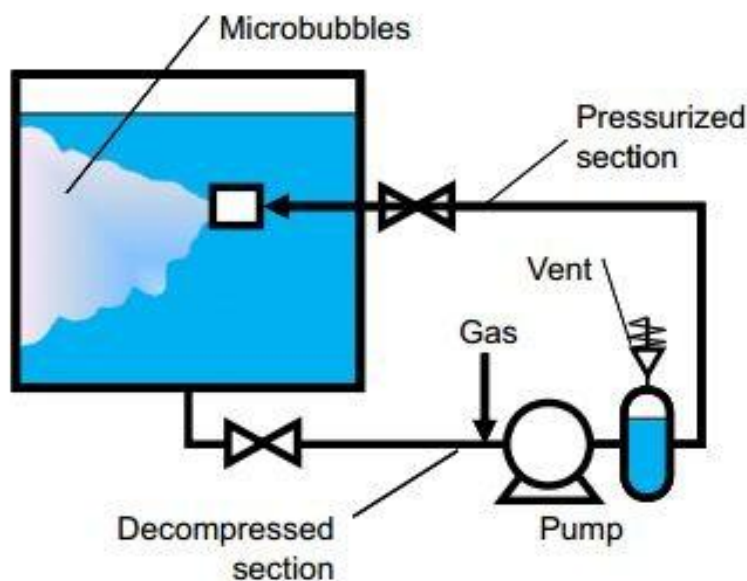
## ۲-۸-۲ روش‌های تولید میکرو حباب‌ها

برای تولید حباب‌ها معمولاً از روزنه‌ها استفاده می‌شود. حباب‌های ریز معمولاً با استفاده از محیط متخلخل<sup>۱</sup>، نازل‌های جریان ثابت<sup>۲</sup>، غشا<sup>۳</sup> و یا پخش‌کننده‌های گاز<sup>۴</sup> تولید می‌شوند (Tsuge, 1986, Terasaka and Tsuge, 1990). تولید میکرو حباب‌ها با استفاده از این روش‌ها به دلیل به هم پیوستن حباب‌ها، کاری سخت و دشوار است (Li and Tsuge, 2006)؛ بنابراین برای تولید حباب‌های میکرو از مولدهایی از نوع فشاری، کاویتاسیون و جریان چرخشی استفاده می‌شود. در ادامه توضیح مختصری درباره این مولدها ارائه شده است.

## نوع فشاری (تولید با کمک فشار بالای گاز)

سیستم تولید میکرو حباب تحت فشار، بر پایه قانون هنری استوار است. بر اساس این قانون در فشار بالا گاز بیشتری در داخل مایع حل می‌شود. در روش تولید حباب با کمک فشار بالای گاز، مایع در یک محفظه با فشار زیاد از گاز اشباع می‌شود و سپس از طریق یک نازل در محیط با فشار اتمسفر، تزریق می‌شود. در فرآیند سقوط ناگهانی فشار، میکرو حباب‌ها تشکیل می‌شوند. این نوع روش تولید میکرو حباب در سیستم‌های تصفیه آب و فاضلاب به کار می‌رود. سیستم شناورسازی هوای محلول<sup>۵</sup> از این نوع است که در آن هوا در فشار ۰/۴ تا ۰/۵ مگا پاسکال در آب حل شده و سپس از طریق نازل‌های کاهش فشار به یک مخزن آزاد می‌شود. اندازه حباب‌های تولیدشده با استفاده از سیستم نوع فشار بین ۱۰-۱۰۰ میکرومتر است (Vlyssides et al, 2004). علاوه بر این میانگین اندازه حباب‌ها با افزایش فشار اشباع کاهش پیدا می‌کند؛ اما افزایش فشار در بالاتر در ۰/۵ مگا پاسکال تأثیر خیلی کمی بر اندازه حباب‌ها دارد (Han et al., 2002). در شکل ۲-۴ طرح شماتیکی از مولد نوع فشاری نمایش داده شده است.

- 
- 1- Porous media
  - 2- Constant flow nozzles
  - 3- Membranes
  - 4- Gas spargers
  - 5- Dissolved Air Flotation System



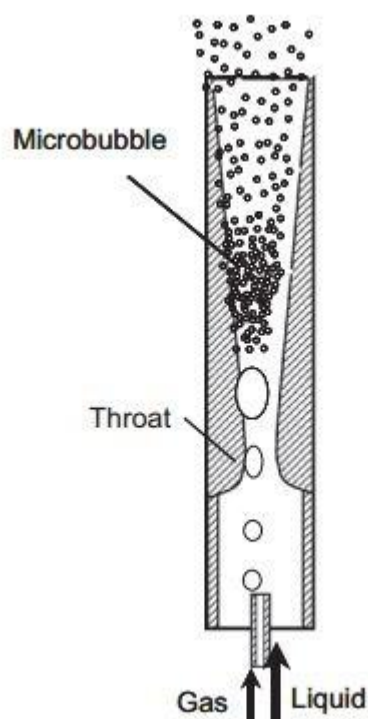
شکل ۲-۴: شماتیکی از مولد میکرو حباب نوع فشاری

## نوع کاویتاسیون

زمانی که فشار محیطی در یک نقطه از سیال به زیر فشار بخار می‌رسد، سیال در دمای محیط دچار یک تغییر فاز می‌شود که منجر به تولید فضاهای خالی می‌شود که به آن حباب‌های کاویتاسیون گفته می‌شود. کاویتاسیون در پمپ‌ها، پروانه‌ها و موتورهای رخ می‌دهد که معمولاً در اکثر این موارد فرآیندی نامطلوب و زیان‌آور است. با این حال محققان از این پدیده برای تولید میکرو حباب استفاده می‌کنند.

لوله ونتوری یک مثال از همین مورد است (Takamura, 2004; Fujiwara et al, 2003).

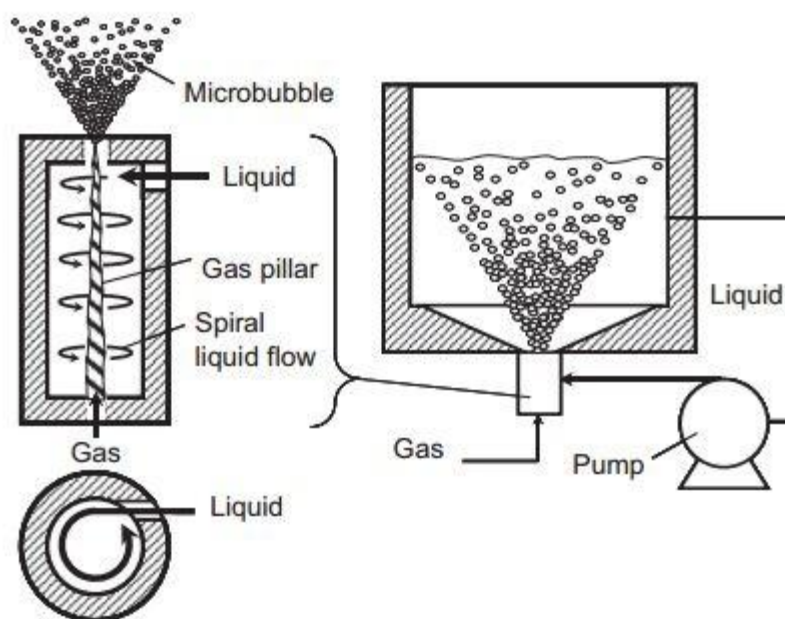
همان‌طور که در شکل (۲-۵) نشان داده شده است، لوله ونتوری دارای یک شکل مخروطی است. اگر یکی پمپ، سیال را به داخل لوله ونتوری منتقل کند، در بخش فشرده‌شده لوله ونتوری افزایش سرعت رخ می‌دهد و همزمان فشار کاهش پیدا می‌کند که این امر منجر به مکش گاز از طریق لوله ونتوری می‌شود. زمانی که فشار در پایین‌دست دوباره بیشتر می‌شود حباب‌های وارد شده به سیال خرد می‌شوند که این مسئله منجر به تولید حباب‌های کوچک‌تر می‌شود (Fujiwara, 2006).



شکل ۲-۵: شماتیکی از مولد میکرو حباب نوع کاونتاسیون (ونتوری)

### نوع جریان چرخشی

طرح شماتیک مولد میکرو حباب نوع جریان چرخشی در شکل (۲-۵) نشان داده شده است. این نوع مولد دارای شکل مخروطی است. تولید میکرو حباب با پمپاژ آب از مسیر مماسی به داخل مولد آغاز می‌شود، سیال با یک حرکت چرخشی در راستای دیوار داخلی، جریان پیدا می‌کند که منجر به ایجاد یک گردابه می‌شود. مرکز گرداب دارای سطح فشار پایین است (Terasaka et al, 2011). به همین دلیل گاز به داخل آن وارد می‌شود. زمانی که سیال هوا را از مولد با سرعت چرخشی بسیار بالا خارج می‌کند هوا تبدیل به حباب‌های میکرو می‌شود.



شکل ۲-۶: شماتیکی از مولد میکرو حباب نوع جریان چرخشی

## ۲-۹- میکرو- نانو حباب در حوزه آب و فاضلاب

فاضلاب صنعتی اغلب شامل انواع زیادی از ترکیبات آلی مقاوم است که دارای سمیت ذاتی هستند و تجزیه بیولوژیکی به صورت نسبی برای تصفیه این ترکیبات ناکارآمد است؛ بنابراین در حال حاضر تحقیق و جستجو برای جایگزینی فرآیندهای مؤثر در تصفیه ترکیبات آلی بسیار مورد توجه قرار گرفته است.

لی<sup>۱</sup> و همکاران در سال ۲۰۰۹ از تکنولوژی فروپاشی میکرو حباب برای تصفیه فاضلاب حاوی فنول استفاده کردند. فنول از فراوان ترین آلاینده ها در فاضلاب صنعتی کارخانه های شیمیایی، رنگریزی، نساجی و آفت کش ها است. محققین در این پژوهش اثرات میکرو حباب، pH محلول و نوع گاز درون میکرو حباب را بر کاهش فنول مورد بررسی قرار دادند. pH محلول و نوع گاز درون میکرو حباب ها، نقش مهمی در فرآیند تصفیه ایفا می کنند. نتایج این تحقیق نشان داد هنگامی که pH محلول از ۴ به ۲ کاهش یافت، نرخ کاهش فنول تا اندازه زیادی افزایش یافته است. استفاده از میکرو حباب اکسیژن در مقایسه با میکرو حباب هوا کاهش بیشتر فنول را در پی داشته است.

<sup>۱</sup>-Li

محققین بیان کردند که رادیکال‌های OH مسئول اصلی تجزیه فنول در میکرو حباب‌های هوا و اکسیژن و نیتروژن هستند و همچنین شرایط توزیع یون بر سطح واسط آب-گاز تأثیر اساسی بر واکنش تجزیه دارد.

امکان‌سنجی استفاده از تکنولوژی نانو حباب شناور (NBFT) با فرآیند انعقاد/لخته سازی برای تصفیه بهبود یافته فاضلاب صنعت پرداخت شیمیایی (CMP) از طریق آزمایش‌ها در مقیاس آزمایشگاهی و میدانی توسط تسایی<sup>۱</sup> و همکارانش در سال ۲۰۰۷ مورد بررسی قرار گرفت. صنعت نیمه‌هادی یکی از مهم‌ترین بخش‌های تولید قطعه در تایوان است. فرآیند پرداخت مکانیکی شیمیایی یک عمل مهم در فرآیند ساخت نیمه‌هادی است. این فرآیند برای حذف دوغاب زائد CMP و ذرات ریز از سطح قطعه به مقدار زیادی آب فوق خالص (حدود ۴۰٪) نیاز دارد و در نتیجه به همان مقدار هم فاضلاب تولید می‌کند. مدیریت این فاضلاب به دلیل قوانین زیست‌محیطی سخت‌گیرانه برای پساب‌های خروجی، به یک موضوع مهم تبدیل شده است. تصفیه فاضلاب CMP به دلیل مقدار جامدات زیاد، کدورت و قلیائیت بالای آن، توجه خاصی را به خود جلب کرده است. محققان متعددی کاربرد روش‌های متعارف تصفیه شامل انعقاد/لخته سازی، شناورسازی، میکرو فیلتراسیون/اولترافیلتراسیون و الکترو فیلتراسیون/الکترو دیالیز را برای تصفیه فاضلاب CMP استفاده کردند. در این میان فرآیند انعقاد/لخته سازی در اکثر واحدهای تولید نیمه‌هادی‌ها در تایوان اعمال شده است. این روش نیازمند مقادیر بسیار زیاد مواد شیمیایی و مواد منعقد کننده است و درعین حال دارای هزینه‌های بهره‌برداری زیاد است. علاوه بر این موارد، حجم بالای لجن تولیدشده در فرآیند انعقاد و لخته سازی نیازمند مدیریت قبل از دفع است؛ بنابراین توسعه تکنیک تصفیه مناسب و مقرون‌به‌صرفه با راندمان بالاتر برای کاهش مشکلات موجود، بسیار مهم است. در تحقیق حاضر توجه خاصی به امکان‌سنجی استفاده از NBFT به همراه فرآیند انعقاد/لخته سازی برای تصفیه بهبود یافته فاضلاب CMP اعمال شده است. در این مطالعه اثرات دوز انعقاد/لخته سازی و pH بر حذف کدورت بررسی شده است. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده مشاهده گردید که NBFT به همراه فرآیند انعقاد می‌تواند به‌طور مؤثر در شرایط بهینه دوز ۵۰-۶۰ mg/L برای PAC، دوز ۵-۱۰ mg/L برای NaOH، نرخ برگشت جریان معادل ۱۰-۲۰٪ و زمان ماند هیدرولیکی ۱ ساعت

بهره‌برداری شود. زمانی که از PAC به‌عنوان ماده منعقد کننده استفاده می‌شود، تصفیه فاضلاب CMP می‌تواند بدون تنظیم pH انجام گردد. هزینه‌های بهره‌برداری موردنیاز برای NBFT به همراه فرآیند انعقاد بسیار کمتر از هزینه‌های موردنیاز برای روش‌های تصفیه متعارف که در حال حاضر در اکثر واحدهای تولید نیمه‌هادی‌ها در تایوان استفاده می‌شود، است.

گوتوه<sup>۱</sup> و همکاران در فرآیند ۲۰۰۶ از فرآیند شناورسازی با میکرو حباب‌ها برای حذف نفت از خاک استفاده کردند. نتایج این تحقیق، حذف ۷۰ تا ۸۰ درصدی نفت را در بر داشت. این امر به دلیل ویژگی‌های فوق‌العاده جذب فیزیکی و سرعت بالا آمدن آهسته میکرو حباب‌ها گزارش شد.

از میکرو حباب‌ها با هدف افزایش جرم انتقال اوزون در فرآیند اوزوناسیون استفاده شد. میکرو حباب‌های اوزون برای تجزیه ترکیبات آلی و همچنین به‌عنوان اکسیدکننده و ماده گندزدا در آب آشامیدنی می‌تواند استفاده شود (Li and Tsuge, 2007).

ژنگ<sup>۲</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۵، اثر فرآیند اوزوناسیون به کمک میکرو حباب را در تصفیه فاضلاب تولیدشده در کارخانه تولیدکننده الیاف اکرولیک موردبررسی قرار دادند. محققین در این پژوهش به بررسی فرآیند اوزوناسیون به کمک میکرو حباب در مقایسه با اوزوناسیون توسط حباب‌های ماکرو پرداختند. الیاف اکرولیک به‌طور گسترده‌ای در تولید پتو، خز مصنوعی و... استفاده می‌شوند. فاضلاب تخلیه‌شده از صنعت تولید الیاف اکرولیک حاوی مقادیر قابل‌توجهی از مواد آلی و غیر آلی مقاوم هستند. به علت تجزیه زیستی ضعیف، تجزیه زیستی این نوع فاضلاب مؤثر نیست.

نتایج آزمایش‌ها نشان داد که اثربخشی حذف COD فاضلاب در میکرو حباب اوزون ۲۵٪ بیشتر از ماکرو حباب اوزون بوده است که این امر به دلیل حلالیت بالاتر اوزون، تولید بیشتر رادیکال‌های هیدروکسیل و زتا پتانسیل نسبتاً بالای میکرو حباب‌ها است. همچنین تجزیه بیولوژیکی فاضلاب با میکرو حباب اوزون تا اندازه زیادی افزایش یافته است که دلیل آن، تجزیه ترکیبات آلی مقاوم است.

1- Gotoh

۲- Zheng

چو<sup>۱</sup> و همکاران در سال ۲۰۰۸ طی پژوهشی از میکرو حباب اوزون برای تصفیه فاضلاب نساجی استفاده کردند. آن‌ها بیان کردند که استفاده از میکرو حباب‌ها حذف رنگ و COD بیشتری نسبت به حالتی که از حباب‌های معمولی استفاده شده است دارد.

به‌منظور افزایش پیش تصفیه فاضلاب رنگریزی، بررسی اثر میکرو حباب‌ها بر فرآیند شناورسازی / انعقاد توسط لی یو<sup>۲</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۰ انجام شده است.

فاضلاب رنگریزی حاصل از صنعت نساجی یک منبع عمده آلودگی محیط‌زیست محسوب می‌شود. به‌طور کلی تصفیه فاضلاب رنگریزی به دلیل غلظت بالای رنگ، غلظت بالای COD و زیست‌تخریب‌پذیری بسیار کم همواره سخت و مشکل است. ترکیبی از فرآیند شناورسازی هوا و انعقاد یک روش مؤثر برای تصفیه فاضلاب رنگریزی است.

اندازه حباب، یکی از فاکتورهایی با اثری قابل توجه در شناورسازی است. محققین در این پژوهش از PAC به‌عنوان منعقد کننده استفاده کردند و میزان کاهش COD و رنگ را در ۲ حالت فرآیند شناورسازی انعقاد میکرو حباب و شناورسازی / انعقاد معمولی مورد بررسی قرار دادند.

نتایج آن‌ها نشان داد که فرآیند شناورسازی / انعقاد میکرو حباب، راندمان حذف ۸۹ درصدی رنگ را سبب شده است که در مقایسه با فرآیند شناورسازی / انعقاد با حباب معمولی میزان کاهش COD و رنگ به ترتیب ۳۰٪ و ۱۱۰٪ افزایش داشته است.

چاکینالا<sup>۳</sup> و همکاران در سال ۲۰۰۷ تصفیه فاضلاب صنعتی را به‌وسیله ترکیب فرآیند کاویتاسیون هیدرودینامیک و فرآیند فنتون پیشرفته مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها حذف ۶۰ درصدی TOC را از نمونه‌های مورد آزمایش به‌عنوان نتیجه‌ای از این پژوهش بیان کردند. همچنین بیان کردند که ترکیب کاویتاسیون هیدرودینامیکی با فرآیند فنتون پیشرفته، در مرحله پیش تصفیه در تصفیه بیولوژی بسیار مؤثر و کارا است.

1- Cho

۲- Liu

3- Chakinala

تراساکا<sup>۱</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۱ تصفیه فاضلاب مصنوعی ساخته شده با گلوکز را به وسیله سیستم هوازی لجن فعال و استفاده از مولد میکرو حباب به عنوان هواده استفاده کرد، مولد میکرو حباب استفاده شده در این تحقیق از نوع جریان چرخشی بود. محققین در این پژوهش دریافتند که مولد میکرو حباب استفاده شده نرخ انتقال بهتری را نسبت به پخش کننده های گاز معمول دارد، در بررسی اقتصادی مصرف انرژی در دو سیستم مورد مقایسه آن ها (پخش کننده گاز معمولی و مولد میکرو حباب نوع چرخشی) مولد میکرو حباب مصرف برق بیشتری نسبت به پخش کننده معمول دارد. البته وقتی میکرو حباب ساز برای جذب گاز و فرایند تصفیه فاضلاب استفاده می شود نقطه ضعف مصرف بالای برق آن به وسیله بهره مندی سریع میزان جذب گاز جبران می شود.

جیگنشکومار<sup>۲</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۵ اثر کاویتاسیون هیدرودینامیکی بر تصفیه فاضلاب کارخانه داروسازی را مورد بررسی قرار دادند. آن ها برای بررسی تأثیر این روش بر بهبود تصفیه فاضلاب مورد آزمایش، پارامتر COD را اندازه گیری کردند. برای دست یافتن به زمان بهینه، یک مجموعه آزمایش در فواصل زمانی مشخص در بازه ۱۵۰ - ۰ دقیقه انجام دادند. بر اساس نتایج آن ها بیشترین راندمان حذف COD ۸۰.۳۶ درصد و زمان بهینه آزمایش ۹۰ دقیقه به دست آمد.

کاوهارا<sup>۳</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۳ به بررسی اثر همزمان میکرو حباب ها و باکتری های هوازی در تصفیه آب آلوده مصنوعی پرداختند. مولد میکرو حباب آن ها از نوع چرخشی بود. محققین مولد میکرو حباب مذکور را با اسپارژر هوا مقایسه کردند. نتایج آن ها نشان داد که نرخ انتقال اکسیژن در مولد میکرو حباب به صورت قابل ملاحظه ای بیشتر از اسپارژر هوا است. به طوری که ضریب انتقال جرم حجمی برای مولد میکرو حباب ۸ برابر بیشتر نسبت به اسپارژر هوا به دست آمد. برای تصفیه آب نیز نرخ کاهش اکسیژن خواهی بیولوژیک، اکسیژن خواهی شیمیایی و جامدات معلق در مولد میکرو حباب بسیار سریع تر نسبت به اسپارژر هوا بود. آن ها همچنین پی بردند که تصفیه آب آلوده با استفاده همزمان باکتری های هوازی و میکرو حباب می توان توان مصرفی را تا ۶۰ درصد کاهش داد.

---

1- Terasaka

2- Jigneshkumar

3- Kawahara

## ۲-۱۰- جمع‌بندی

با توجه ویژگی‌های فوق‌العاده میکرو نانو حباب‌ها و کاربردهای ذکرشده از میکرو حباب‌ها، در این پژوهش به بررسی تأثیر میکرو - نانو حباب‌های تولیدشده بر اساس فرآیند کاویتاسیون هیدرودینامیکی، در بهبود تصفیه هوازی فاضلاب شهری اقدام گردید. همچنین پایداری نانو حباب‌ها در آب موردبررسی قرار گرفت و میزان ضریب حجمی انتقال اکسیژن (میزان انتقال اکسیژن) با استفاده از روش دینامیکی در سیستم نانو حباب‌ساز و پخش‌کننده سرامیکی منفذ ریز اندازه‌گیری و مقایسه شد.

## فصل ۳ مواد و روش‌ها

## ۳-۱- مقدمه

در این فصل ابتدا مواد و تجهیزات استفاده شده در این پژوهش معرفی می‌شوند و پس‌از آن روند انجام آزمایش‌ها بیان می‌شود. در ابتدا، برای تأیید برتری سیستم نانو حباب‌ساز، عملکرد سیستم نانو حباب‌ساز با سیستم پخش‌کننده منفذ ریز سرامیکی مورد بررسی قرار گرفت. در مرحله بعد، پایداری نانو حباب‌ها مورد آزمایش قرار گرفتند. در انتها نیز آزمایش‌ها مربوط به تأثیر میکرو - نانو حباب‌ها بر بهبود تصفیه هوازی فاضلاب شرح داده شد.

## ۳-۲- مواد

## ۳-۲-۱ فاضلاب شهری

فاضلاب شهری مورد استفاده در این پژوهش از تصفیه‌خانه فاضلاب شهری، شاهرود تأمین گردید که روش مورد استفاده در این تصفیه‌خانه برکه‌های تثبیت بدون هوادهی است. طراحی به این صورت است که فاضلاب حمل شده توسط کانال بتنی پس از گذر از آشغال‌گیر، وارد حوضچه‌های بی‌هوازی می‌شود. پس از مدت زمانی (که بر اساس محاسبات انجام شده در حال حاضر ۴۵ روز است) فاضلاب به برکه‌های اختیاری سرریز شده و پس از حدود ۶۲ روز قابل تخلیه به محیط است.

## ۳-۳- تجهیزات

## ۳-۳-۱ تجهیزات مورد استفاده برای هوادهی

الف) تجهیزات سیستم نانو حباب‌ساز: در این سیستم مخزنی ۴۰ لیتری جهت نگهداری سیال، یک عدد پمپ سانتریفیوژ (مدل PK ساخت شرکت پدرولو ایتالیا با قدرت ۳۷۵ وات)، سیستم انتقال (لوله) و مولدهای میکرو- نانو حباب به کار رفته است

ب) تجهیزات سیستم پخش‌کننده منفذ ریز سرامیکی: در این سیستم هوادهی از یک کمپرسور دمنده هوای بدون روغن، سیستم انتقال (شیلنگ)، پخش‌کننده هوای سرامیکی به داخل سیال و یک مخزن ۴۰ لیتری جهت نگهداری سیال استفاده شد.

## ۳-۳-۲ دستگاه‌های مورد استفاده در آزمایش‌ها

مشخصات دستگاه‌های استفاده شده در این پژوهش، در جدول ۱-۳ آورده شده است.

جدول ۱-۳: مشخصات عمومی دستگاه‌های مورد استفاده

| پارامتر مورد اندازه‌گیری | نام دستگاه     | مدل حسگر   | شرکت / کشور سازنده |
|--------------------------|----------------|------------|--------------------|
| PH                       | TDS meter      | PE-01      | Lotrun (تایوان)    |
| هدایت الکتریکی           |                | YK-200PCT  |                    |
| کل جامدات محلول          |                | YK-200PCT  |                    |
| اکسیژن محلول             | smart CHEM-LAB | ED1-123400 | TPS (استرالیا)     |
| دما                      |                | Thermo     |                    |
| کدورت                    | Turbi Check    |            | Lovibond (آلمان)   |
| اکسیژن خواهی بیولوژیک    | BOD meter      |            | WTW (آلمان)        |
| اکسیژن خواهی شیمیایی     | COD meter      |            | Aqua (آلمان)       |

## ۳-۴-۲ روش‌ها

## ۳-۴-۱ مکانیسم هوادهی به وسیله سیستم میکرو-نانو حباب ساز

در این پژوهش، حباب در ابعاد میکرون و نانومتری در آب توسط دستگاه مولد همزمان میکرو-نانو حباب به شماره ثبت اختراع ۸۳۹۹۸ در آزمایشگاه تحقیقاتی نانو سیالات در محیط‌های متخلخل دانشگاه صنعتی شاهرود تولید شد. این دستگاه بر مبنای فرآیند کاویتاسیون هیدرودینامیکی، نانو-میکرو حباب‌هایی با ابعاد ریز از چند نانومتر تا چند میکرومتر تولید می‌کند.

## ۳-۴-۲ اندازه‌گیری ابعاد حباب‌های تولیدشده

خصوصیات فیزیکی و شیمیایی  $MNB^1$  تولیدی مکرراً توسط آزمایشگاه‌های دانشگاه فردوسی و دانشگاه گرگان آزمایش شده و نانو بودن اندازه حباب‌ها به تائید رسیده است.

برای اندازه‌گیری ابعاد حباب‌های تولیدی توسط دستگاه میکرو-نانو حباب‌ساز از دستگاه Nano Particle Size Analyzer دانشگاه گرگان استفاده شد. اساس کار این دستگاه تئوری مای طراحی شده است. دستگاه مزبور با روش پراش نور دینامیکی کار می‌کند و قادر به اندازه‌گیری ذرات در محدوده ابعادی ۱ نانومتر تا ۶ میکرون است.

## ۳-۴-۳ پایداری نانو - میکرو حباب‌های تولیدشده

به جهت بررسی پایداری نانو حباب‌ها در آب تمیز، حجم برابر آب توسط دو سیستم هوادهی (سیستم نانو حباب‌ساز و پخش‌کننده منفذ ریز سرامیکی) برای مدت یکسان در دو مخزن مشابه (از نظر هندسه و جنس بدنه) و تحت شرایط دمایی و زمانی یکسان، مورد هوادهی قرار گرفت. با گذشت یک ساعت از شروع هوادهی، سیستم‌های هوادهی خاموش گردید و پس از آن، میزان تغییرات اکسیژن محلول ( $DO^2$ ) به مدت ۵۱ ساعت هر ۵ دقیقه اندازه‌گیری و ثبت شد.

۳-۴-۴ اندازه‌گیری و محاسبه ضریب حجمی انتقال اکسیژن ( $K_L a$ )

در این تحقیق ضریب انتقال جرم با استفاده از تغییرات غلظت اکسیژن در مخزن، در طول زمان محاسبه شده است. بر اساس روش دینامیکی تجمع یک ماده در مخزن برابر است با مقدار ماده‌ای که از فصل مشترک به داخل فاز مایع منتقل می‌شود.

از آنجایی که مخزن نسبت به مایع به صورت ناپیوسته کار می‌کند، بنابراین میزان انتقال جرم در واحد زمان از رابطه (۲-۲) قابل محاسبه است.

$$\frac{dc}{dt} = K_L a (C_s - C) \quad (2-2 \text{ تکراری})$$

<sup>۱</sup> - Micro – Nano Bubble

<sup>۲</sup> - Dissolved Oxygen

چنانچه دما ثابت باشد ( $K_L a$ ) مقدار ثابت خواهد بود. با جدا کردن متغیرها و انتگرال‌گیری از طرفین معادله، رابطه زیر به دست خواهد آمد.

$$\int_{C_0}^{C_t} \frac{dC_t}{C^* - C_t} = \int_0^t K_L \cdot a \times dt \rightarrow \ln(C^* - C_t) = -K_L \cdot a \times t + \text{constant} \quad [۱-۳]$$

قرار دادن شرط مرزی و شرط اولیه در معادله بالا، رابطه (۲-۳) را نتیجه می‌دهد

$$\ln \frac{(C^* - C_{t_0})}{(C^* - C_t)} = K_L a \times t \quad [۲-۳]$$

اگر سرعت رسیدن به تعادل E را نسبت انتقال جرم لحظه‌ای به میزان حداکثر انتقال جرم تعریف کنیم.

$$E = \frac{(C_t - C_{t_0})}{(C^* - C_t)} \quad [۳-۳]$$

با ترکیب معادلات ۲-۳ و ۳-۳ خواهیم داشت

$$\ln \frac{(1)}{(1-E)} = K_L a \times t \quad [۴-۳]$$

با رسم تغییرات منحنی  $\ln \frac{(1)}{(1-E)}$  نسبت به زمان، شیب منحنی  $K_L \cdot a$  را می‌دهد.

به همین منظور میزان تغییرات اکسیژن محلول را در دو سیستم هوادهی نانو حباب‌ساز و پخش‌کننده سرامیکی منفذ ریز از ابتدا فعالیت هواده‌ها تا هنگام نزدیک شدن به حالت اشباع ثبت و برداشت گردید. در تمام این مدت کنترل دمایی نیز صورت پذیرفت. با توجه به معادلات فوق و داده‌های به‌دست‌آمده میزان ضریب انتقال اکسیژن برای هر دو سیستم هوادهی محاسبه گردید.

غلظت اشباع اکسیژن که در معادلات فوق آمده است با استفاده از جداول ارائه شده در پیوست بدست آمده و در محاسبات استفاده شده است.

### ۳-۴-۵ آزمایش‌های مربوط به تأثیر میکرو - نانو حباب‌ها بر فاضلاب

در این قسمت روش نمونه‌برداری، نگهداری و انتقال نمونه‌ها بیان می‌شود. در ادامه آزمایش‌ها انجام‌شده بر روی فاضلاب شهری در حضور و عدم حضور نانو حباب تشریح می‌شود.

### ۳-۴-۵-۱ نمونه‌برداری فاضلاب شهری

در این پژوهش نمونه‌برداری‌ها بر اساس استاندارد ملی ایران روش‌های نمونه‌برداری آب (استاندارد شماره ۲۳۴۷) انجام پذیرفته است.

در هر روش نمونه‌گیری قواعد عمومی زیر به کار رفته است.

الف) نمونه‌ها نشان‌دهنده وضعیت موجود در نقطه‌ای که از آن محل عمل نمونه‌گیری انجام گرفته است، باشند.

ب) حجم نمونه‌ها به نحوی انتخاب شوند که امکان تجدید پذیری آزمون به تعداد مورد نظر در روش آزمون مربوطه فراهم گردد.

ج) نمونه‌ها طبق روش‌های ایمن و سازگار با دستورالعمل‌های بهداشتی جمع‌آوری، بسته‌بندی و حمل‌ونقل گردید و مراقبت‌های لازم برای تأمین شرط عدم تغییر در ترکیبات و خصوصیات ویژه نمونه تا مرحله اندازه‌گیری در آزمایشگاه در مورد آن اعمال شد.

مراقبت‌های لازم عبارت بودند از نگهداری در فلاسک، حمل در محیط بدون نور و سرعت عمل در انتقال نمونه به آزمایشگاه، که با توجه به مسافت اندک بین تصفیه‌خانه تا آزمایشگاه به نظر می‌رسد که در هر سه موضوع موفقیت حاصل شده باشد.

نمونه‌برداری‌ها به‌صورت لحظه‌ای انجام شد که در آن نمونه گرفته‌شده از یک محل به‌خصوص فقط معرف خصوصیات آن در زمان نمونه‌گیری است. شایان‌ذکر است این روش برای آزمون‌های باکتریولوژی و برخی آزمون‌های رادیولوژی مناسب است.

### ۳-۴-۵-۲ نگهداری و انتقال نمونه‌های فاضلاب شهری

همان‌گونه که در استانداردهای بین‌المللی و ملی نیز به آن اشاره شده است، نگهداری کامل و بدون اشکال نمونه‌ها درواقع غیرممکن است و صرف‌نظر از طبیعت نمونه‌ها، دستیابی به پایداری هریک ترکیبات موجود در آن هیچ‌گاه به دست نمی‌آید (US-EPA, ۱۹۸۳). شرایط نگهداری و انتقال نمونه‌ها جهت انجام آزمایش‌های مختلف باهم متفاوت است. نمونه‌ای از استاندارد نگهداری در جدول ۳-۲ آورده شده است. تمام مراحل انجام نمونه‌گیری و انتقال نمونه‌ها و نگهداری نمونه‌ها منطبق بر استاندارد ملی نگهداری نمونه‌ها به شماره ۲۳۴۷ و (US-EPA (2007 است.

جدول ۳-۲: استاندارد نگهداری و انتقال نمونه جهت انجام آزمایش و اندازه‌گیری (برگرفته از US-EPA 2007)

| پارامتر                      | نگهدارنده                                                      | بیشترین زمان نگهداری |
|------------------------------|----------------------------------------------------------------|----------------------|
| اسیدیته-قلیائیت              | نگهداری در دمای 4°C                                            | ۲۴ ساعت              |
| اکسیژن بيو شیمیایی مورد نیاز | نگهداری در دمای 4°C                                            | ۶ ساعت               |
| کلیسیم                       | نیاز ندارد                                                     |                      |
| اکسیژن مورد نیاز شیمیایی     | ۲ میلی لیتر در لیتر اسید سولفوریک                              | ۷ ساعت               |
| کلراید                       | نیاز ندارد                                                     |                      |
| رنگ                          | نگهداری در دمای 4°C                                            | ۲۴ ساعت              |
| سیانید                       | هیدروکسید سدیم تا PH برابر ۱۰                                  | ۲۴ ساعت              |
| اکسیژن محلول                 | تعیین در محل                                                   | بدون نگهداری         |
| فلوراید                      | نیاز ندارد                                                     |                      |
| سختی                         | نیاز ندارد                                                     |                      |
| فلزات کل                     | ۵ میلی لیتر در لیتر اسید نیتریک                                | ۶ ماه                |
| فلزات محلول                  | فیلتراسیون، ۳ میلی لیتر در لیتر اسید نیتریک                    | ۶ ماه                |
| نیتروژن آمونیاکی             | ۴۰ میلی گرم $HgCl_2$ ، نگهداری در دمای 4°C                     | ۷ روز                |
| نیتروژن کج‌دال               | ۴۰ میلی گرم $HgCl_2$ ، نگهداری در دمای 4°C                     | بی ثبات              |
| نیتروژن - نیتراتی - نیتريتی  | ۴۰ میلی گرم $HgCl_2$ ، نگهداری در دمای 4°C                     | ۷ روز                |
| روغن و گریس                  | ۲ میلی لیتر در لیتر اسید سولفوریک، نگهداری در دمای 4°C         | ۲۴ ساعت              |
| کربن آلی                     | ۲ میلی لیتر در لیتر اسید سولفوریک (PH=2)                       | ۷ روز                |
| PH                           | عدم دسترسی                                                     |                      |
| ترکیبات فنولی                | ۱ گرم $PO_3H_4 + CUSO_4$ تا PH برابر با ۴، نگهداری در دمای 4°C | ۲۴ ساعت              |
| فسفر                         | ۴۰ میلی گرم $HgCl_2$ ، نگهداری در دمای 4°C                     |                      |
| جامدات                       | عدم دسترسی                                                     | ۷ روز                |
| ضریب هدایت ویژه              | نیاز ندارد                                                     |                      |
| سولفات                       | نگهداری در دمای 4°C                                            | ۷ روز                |
| سولفید                       | ۲ میلی لیتر در لیتر استات                                      | ۷ روز                |
| کدورت                        | عدم دسترسی                                                     |                      |

### ۳-۴-۵-۳ روند انجام آزمایش‌ها بر روی فاضلاب در حضور و عدم حضور نانو حباب پارامترهای مورد بررسی:

در ادامه به جهت بررسی اثر میکرو نانو حباب‌ها بر بهبود تصفیه فاضلاب شهری پارامترهای COD، BOD، EC، TDS، pH و DO مورد آزمایش قرار گرفتند.

#### ۳-۴-۵-۱ شاخص BOD و اکسیژن محلول

برای شناسایی و بررسی میکرو نانو حباب‌ها بر بهبود فاضلاب شهری، میزان اکسیژن خواهی بیولوژیک در غلظت‌های مختلف و تغییرات اکسیژن محلول مورد آزمایش قرار گرفت. شایان ذکر است که نمونه های فاضلاب برای دارا بودن میکرو ارگانیسم های هوازی و بی هوازی مخلوطی از فاضلاب ورودی، فاضلاب برکه بی هوازی و فاضلاب برکه اختیاری است.

#### آماده‌سازی نمونه‌ها

آب هوادهی شده به‌وسیله پخش‌کننده منفذ ریز سرامیکی و نانو سیال آماده‌شده به‌وسیله مولد نانو حباب‌ساز با نسبت‌های آب به فاضلاب ۱:۱، ۱:۱.۲۵ و ۱:۱.۵ در حجم برابر یک لیتر آماده گردید. سپس از آن میزان اکسیژن محلول بلافاصله بعد از اختلاط اندازه‌گیری گردید. با گذشت ۴ ساعت از لحظه آماده‌سازی نمونه‌ها اندازه‌گیری میزان اکسیژن خواهی بیولوژیک و میزان اکسیژن محلول انجام شد.

#### روش انجام آزمایش

برای اندازه‌گیری میزان DO پس از کالیبره کردن دستگاه، حسگر اکسیژن محلول در داخل نمونه قرار داده شد و میزان اکسیژن محلول قرائت گردید. شایان ذکر است که قبل از انجام اندازه‌گیری باید از سالم بودن لایه غشایی حسگر کافی بودن محلول پرکننده حسگر اطمینان حاصل شود.

محلول پرکننده حسگر، KCl، ۰.۱ مولار است.

برای اندازه‌گیری BOD به ترتیب مراحل زیر انجام شد

- صاف کردن حجم ۴۳۲ میلی‌لیتر نمونه آماده‌شده برای هر آزمایش با استفاده از کاغذ صافی و سیستم فیلتراسیون

- قرار دادن نمونه‌های صاف‌شده در ظروف اندازه‌گیری BOD

- ریختن ۱۱ قطره بازدارنده نیتریفیکاسیون

کل اکسیژن مورد نیاز بیولوژیک فاضلاب، از مجموع اکسیژن خواهی بیولوژیک کربنی<sup>۱</sup> و نیتروژنی<sup>۲</sup> تشکیل شده است. برخلاف اکسیژن خواهی کربنی که نسبت مستقیم با غلظت ترکیبات آلی کربنه قابل تجزیه بیولوژیکی دارد، اکسیژن خواهی نیتروژنی، با تعداد میکروارگانیسم‌های نیتریفایر در نمونه مورد آزمایش متناسب است. به‌طور معمول، به دلیل سرعت کم رشد نیتریفایرها، همواره فرض بر این است که در آزمایش اکسیژن خواهی بیولوژیک پنج‌روزه، اکسیژن خواهی نیتریفیکاسیون نقشی ندارد. اگرچه این فرض در رابطه با فاضلاب تصفیه‌شده، به‌ویژه فاضلاب شهری تصفیه نشده صحیح است ولی در رابطه با فاضلاب تصفیه‌شده، به‌ویژه پساب لاگون هوادهی صادق نیست، زیرا  $BOD_5$  پساب خروجی از لاگون هوادهی اغلب دارای NBOD نیز هست (خرسندی و همکاران، ۱۳۹۱).

بر اساس موارد فوق، آژانس حفاظت از محیط‌زیست آمریکا، استفاده از مواد بازدارنده نیتریفیکاسیون را در آزمایش‌های اکسیژن خواهی بیولوژیک پنج‌روزه مجاز اعلام کرده است و به‌جای  $BOD_5$ ، شاخص  $CBOD_5$  را برای ارزیابی کیفیت پساب خروجی از تصفیه ثانویه خصوصاً برکه‌های تثبیت و لاگون‌های هوادهی توصیه کرده است.

بر این اساس در تمام مراحل اندازه‌گیری اکسیژن خواهی بیولوژیک، به جهت دقت در اندازه‌گیری  $CBOD_5$  از بازدارنده نیتریفیکاسیون استفاده شد.

در کل متن این تحقیق هر جا  $BOD_5$  بیان شد منظور  $CBOD_5$  است

1- Carbonaceous Biochemical Oxygen Demand (CBOD)

2- Nitrogenous Biochemical Oxygen Demand (NBOD)

- کالیبره کردن و آماده کردن دستگاه اندازه‌گیری و قرار دادن آهنربای مخصوص داخل ظروف اندازه‌گیری
- قرار دادن قرص NaOH در محفظه مخصوص آن
- تنظیم کردن دمای دستگاه انکوباتور در دمای استاندارد ۲۰ درجه سانتی‌گراد
- جای گذاری ظرف‌های اندازه‌گیری بر روی BOD متر در داخل انکوباتور
- شروع فعالیت دستگاه BOD متر و اندازه‌گیری لحظه‌ای و روزانه BOD نمونه‌ها
- ثبت و برداشت داده‌ها

### ۲-۳-۵-۴-۳ شاخص COD

برای شناسایی اثر میکرو نانو حباب‌ها بر شاخص COD و اثر زمان ماندگاری، آزمایش به شرح زیر طراحی گردید.

#### آماده‌سازی نمونه‌ها

حجم برابری از آب شهری توسط دو سیستم (نانو حباب‌ساز و پخش‌کننده منفذ ریز سرامیکی) به مدت یک ساعت هوادهی گردید، سپس برای آماده‌سازی نمونه‌ها، فاضلاب تهیه‌شده، به دلیل اختلاف معنا دار میزان اکسیژن خواهی بیولوژیک در نمونه های حاوی نانو حباب و نمونه های آماده شده با سیستم پخش کننده سرامیکی منفذ ریز در نسبت ۱:۱ در مقایسه با نسبت های ۱:۰.۲۵ و نسبت ۱:۰.۵، به نسبت ۱:۱ با نانو سیال و آب هوادهی شده توسط پخش‌کننده منفذ ریز سرامیکی ترکیب گردید. میزان اکسیژن خواهی شیمیایی در نمونه‌های آماده شده در زمان‌های ماند ۱، ۲، ۳ و ۴ ساعت اندازه‌گیری شد.

برای تعیین میزان اکسیژن خواهی شیمیایی مراحل زیر به ترتیب انجام شد.

- صاف کردن (فیلتر کردن) نمونه‌ها با استفاده از کاغذ صافی ۴۰ میکرونی
- برداشت ۲ میلی‌لیتر از نمونه صاف‌شده توسط Sampler
- اضافه کردن نمونه فاضلاب به حجم ۲ میلی‌لیتر به داخل ویال COD Low (لازم به ذکر است که ویال COD حاوی ۸ میلی‌لیتر محلول سدیم پرکربنات است).

- قرار گیری محلول آماده‌شده به مدت ۱۲۰ دقیقه در داخل راکتور حرارت دهنده در دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد.
- قرار دادن محلول آماده‌شده در دستگاه COD متر
- قرائت میزان COD

### ۳-۴-۵-۳ پارامترهای دیگر

در این پژوهش پارامترهای pH, EC, TDS و کدورت نیز طبق روش استاندارد اندازه‌گیری شدند. شایان‌ذکر است که به جهت کاهش خطای احتمالی و افزایش اطمینان به داده‌ها، کلیه آزمایش‌ها با ۳ بار تکرار انجام گردید.

## فصل ۴ نتایج و بحث

## ۴-۱- مقدمه

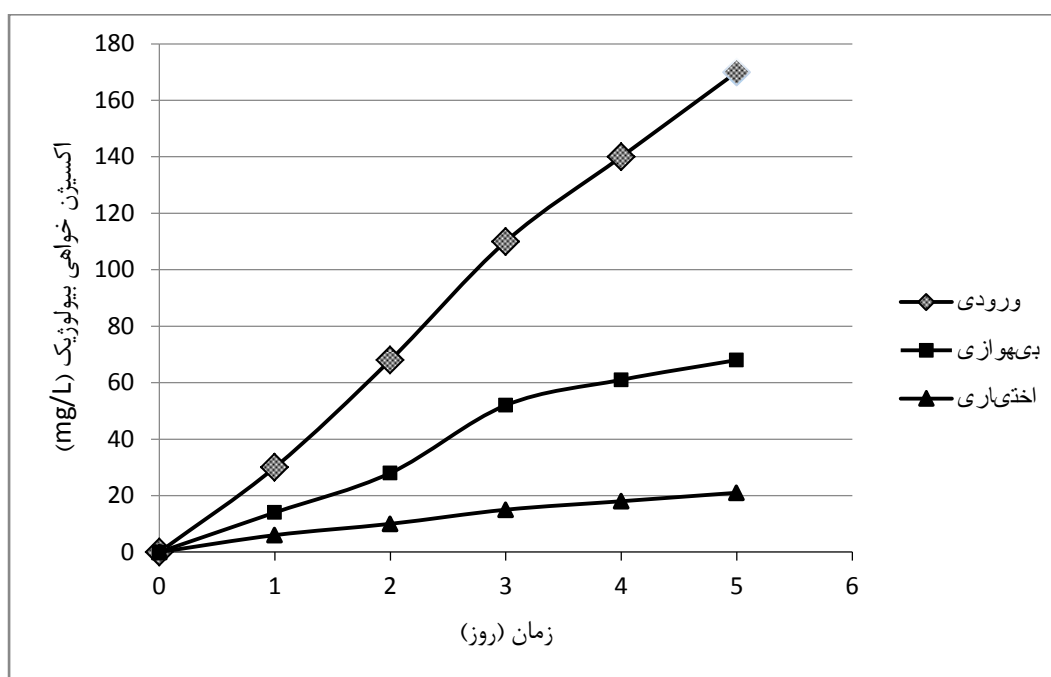
این فصل به بیان و تحلیل نتایج حاصل از این پژوهش اختصاص دارد. در ابتدا خصوصیات کیفی فاضلاب شهر شاهرود ارائه و سپس نتایج حاصل از تغییرات اکسیژن محلول با دو سیستم هوادهی محاسبه و ضریب انتقال اکسیژن بیان شده است. در ادامه پایداری نانو حبابها بیان شدند. در انتها نیز نتایج و تحلیل‌های مربوط به آزمایش‌های انجام شده بر روی فاضلاب در حضور و عدم حضور نانو حبابها آورده شده است.

## ۴-۲- خصوصیات کیفی فاضلاب شهر شاهرود و عملکرد واحدهای مختلف تصفیه‌خانه

بر اساس نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام‌شده، مشخص گردید که فاضلاب مورد استفاده در این پژوهش فاضلابی ضعیف است. خصوصیات کیفی فاضلاب در واحدهای مختلف تصفیه‌خانه در جدول ۴-۱ آورده شده است.

جدول ۴-۱: خصوصیات کیفی فاضلاب شهری، شهر شاهرود

| پارامترها | واحد | ورودی | برکه بی‌هوای | برکه اختیاری |
|-----------|------|-------|--------------|--------------|
| BOD       | mg/L | ۱۷۵   | ۶۸           | ۲۱           |
| COD       | mg/L | ۲۲۳   | ۹۰           | ۲۷           |
| pH        |      | ۷.۴۶  | ۷.۶۲         | ۷.۹۳         |
| TDS       | mg/L | ۱۱۶۹  | ۱۰۰۹         | ۱۱۱۰         |
| EC        | ms   | ۱.۷۶۵ | ۱.۵۱۳        | ۱.۶۶۵        |
| کدورت     | NTU  | ۴۵    | ۳۱           | ۱۵           |



شکل ۴-۱: نمودار میزان اکسیژن خواهی بیولوژیک در قسمت‌های مختلف تصفیه‌خانه فاضلاب شهر شاهرود

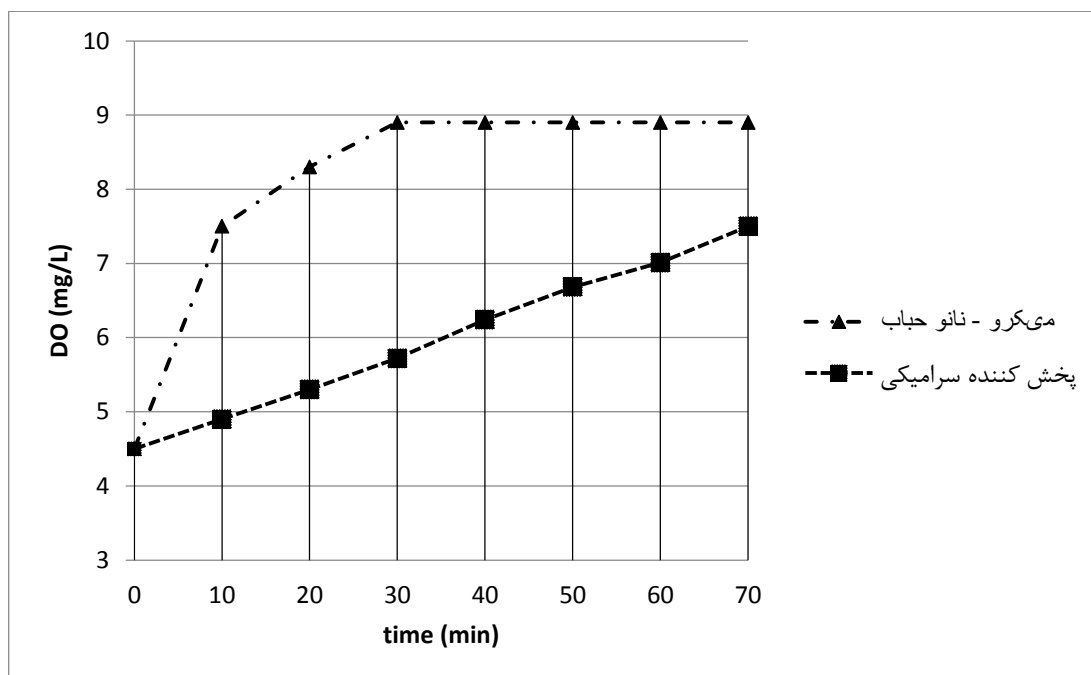
با توجه به نتایج ارائه شده در نمودار ۴-۱ مشخص گردید که میزان اکسیژن خواهی بیولوژیک در برکه بی‌هوازی از ۱۷۰ میلی گرم بر لیتر به ۶۸ میلی گرم بر لیتر می‌رسد (۶۰ درصد کاهش در میزان اکسیژن خواهی بیولوژیک). این در حالی است که میزان اکسیژن خواهی بیولوژیک فاضلاب پس از سرریز شدن از برکه اختیاری (خروجی تصفیه‌خانه) با کاهش ۶۹ درصدی، ۲۱ میلی گرم بر لیتر، می‌رسد.

باید توجه کرد که این عملکرد خوب سیستم تصفیه‌خانه با زمان‌های نگهداری بالا در برکه‌های بی‌هوازی و اختیاری (به ترتیب ۴۵ و ۶۲ روز) حاصل شده است. در حال حاضر به دلیل متصل شدن تنها ۱۵-۲۰ درصد ظرفیت شبکه به سیستم تصفیه‌خانه فاضلاب امکان ذخیره طولانی مدت در برکه‌های ذخیره وجود دارد، اما با توسعه شبکه اتصال و متصل شدن کامل مشترکین به سیستم، با افزایش میزان فاضلاب ورودی به تصفیه‌خانه عملکرد تصفیه‌خانه بسیار تحت تأثیر قرار خواهد گرفت.

بر همین اساس به جهت بالا بردن قدرت عملکردی تصفیه‌خانه، عملکرد سیستم پخش‌کننده سرامیکی به عنوان یک روش هوادهی معمول و سیستم نانو حباب‌ساز به عنوان روشی ابتکاری مورد بررسی و تحقیق قرار گرفت.

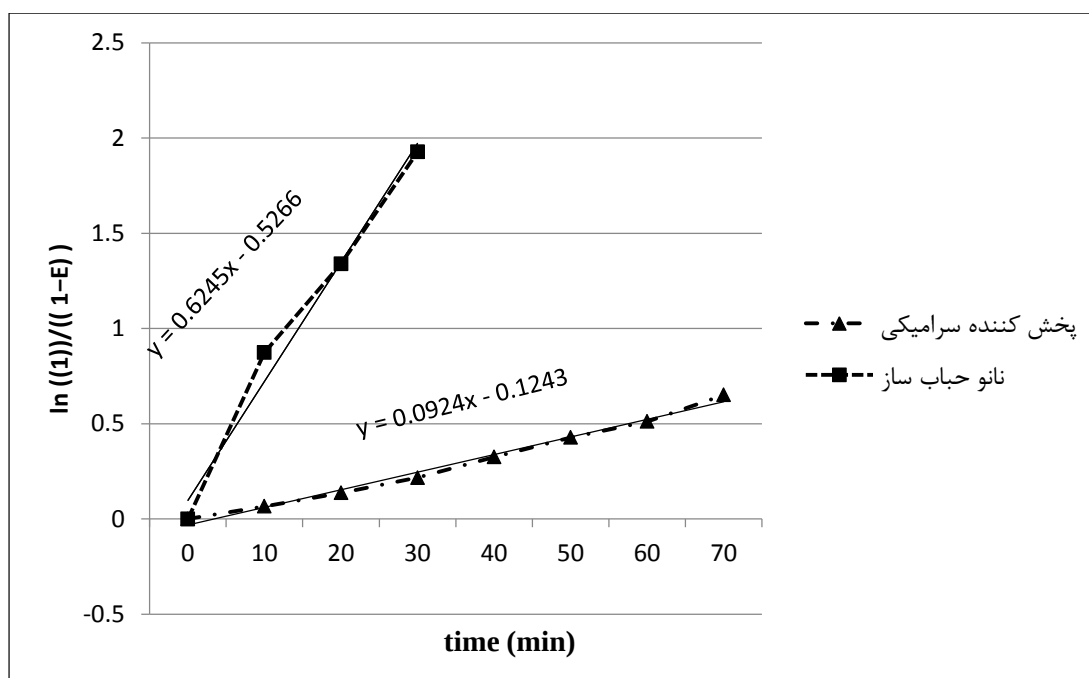
## ۴-۳- مقدار ضریب انتقال اکسیژن

سیستم نانو حباب‌ساز پس از کارکرد ۳۰ دقیقه، توانایی این را داشته که مقدار اکسیژن محلول آب تمیز را به ۸.۹ میلی‌گرم بر لیتر برساند درحالی‌که سیستم پخش‌کننده سرامیکی منفذ ریز پس از یک ساعت کارکرد اکسیژن محلول آب تمیز را به مقدار ۷ میلی‌گرم بر لیتر رسانده است. نتایج آزمایش‌ها در نمودار ۴-۲ نشان داده شده است.



شکل ۴-۲: نمودار تغییرات اکسیژن محلول با زمان در حین فعالیت سیستم‌های هوادهی

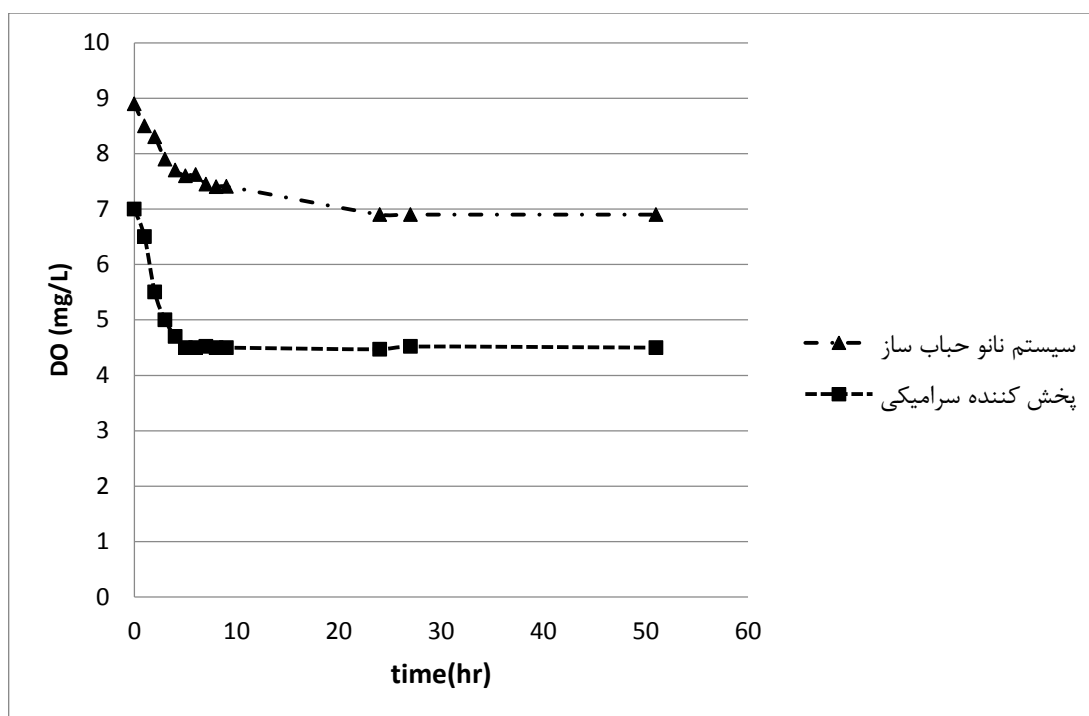
همان‌طور که گفته شد شیب منحنی  $\ln \frac{(1)}{(1-E)}$  نسبت به زمان، بیانگر میزان ضریب حجمی انتقال اکسیژن  $K_L \cdot a$  است. نمودار ۴-۳ منحنی تغییرات  $\ln \frac{(1)}{(1-E)}$  نسبت به زمان است. ضریب حجمی انتقال اکسیژن در سیستم نانو حباب‌ساز در مقایسه با سیستم پخش‌کننده سرامیکی منفذ ریز به دلیل افزایش تولید حباب‌های بسیار کوچک‌تر در مایع و در نتیجه افزایش سطح مشترک گاز - مایع، افزایش می‌یابد. با توجه به معادلات بیان‌شده در بخش ۳-۴-۴ و با استفاده از نتایج حاصل از اندازه‌گیری لحظه‌ای اکسیژن محلول، میزان ضریب حجمی انتقال اکسیژن  $K_L \cdot a$  برای سیستم نانو حباب‌ساز حدود ۷ برابر بیشتر از سیستم هوادهی پخش‌کننده سرامیکی منفذ ریز به دست آمد.



شکل ۴-۳: نمودار منحنی تغییرات  $\ln \frac{(1)}{(1-E)}$  نسبت به زمان

#### ۴-۴- پایداری نانو حباب‌ها و مقدار اکسیژن محلول در آب هوادهی شده

همان‌طور که در نمودار ۴-۴ نشان داده شده است با گذشت ۱۰ ساعت میزان اکسیژن محلول در نانو سیال به مقدار ۷.۲ میلی گرم بر لیتر ثبت شده است درحالی که میزان اکسیژن محلول در آب هوادهی شده با سیستم پخش کننده سرامیکی منفذ ریز با گذشت ۱۰ ساعت به میزان اولیه خود یعنی ۴.۵ میلی گرم بر لیتر رسیده است. دلیل کاهش بسیار آرام میزان اکسیژن محلول نانو سیال نسبت به آب هوادهی شده با پخش کننده سرامیکی منفذ ریز پایداری نانو حباب‌های هوا در نانو سیال است.



شکل ۴-۴: نمودار تفاوت مقداری و پایداری اکسیژن محلول در دو سیستم هوادهی نانو حباب ساز و پخش کننده سرامیکی

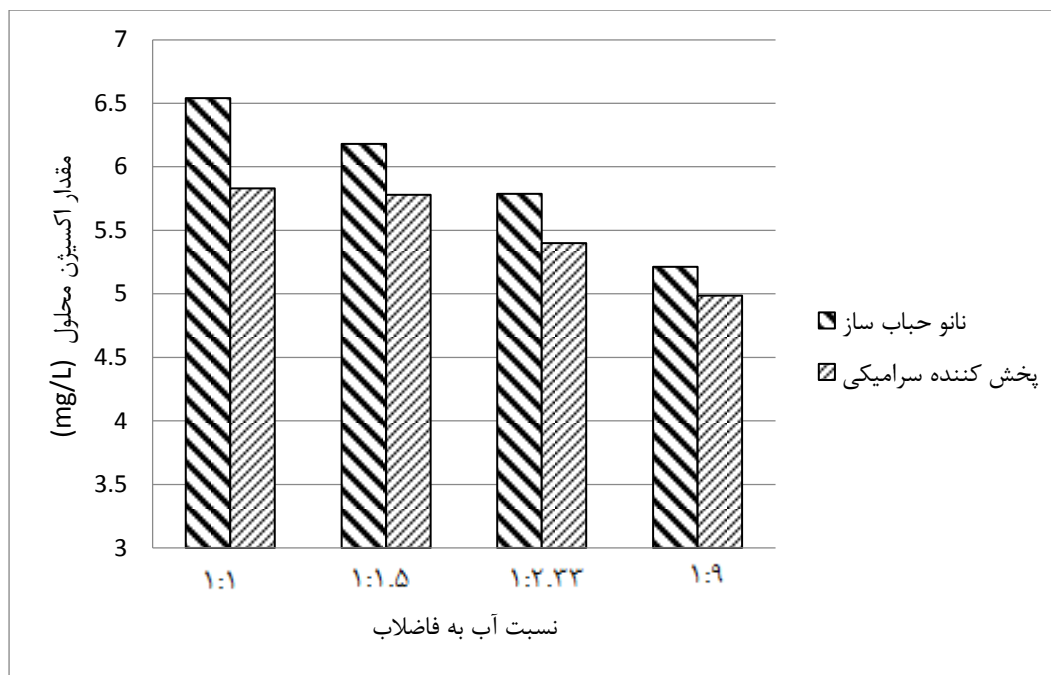
#### ۴-۵- مقدار اکسیژن محلول (DO) در نمونه های فاضلاب

مقدار اکسیژن محلول برای تمام نمونه ها فاضلاب آماده شده در دو مرحله گرفته شد.

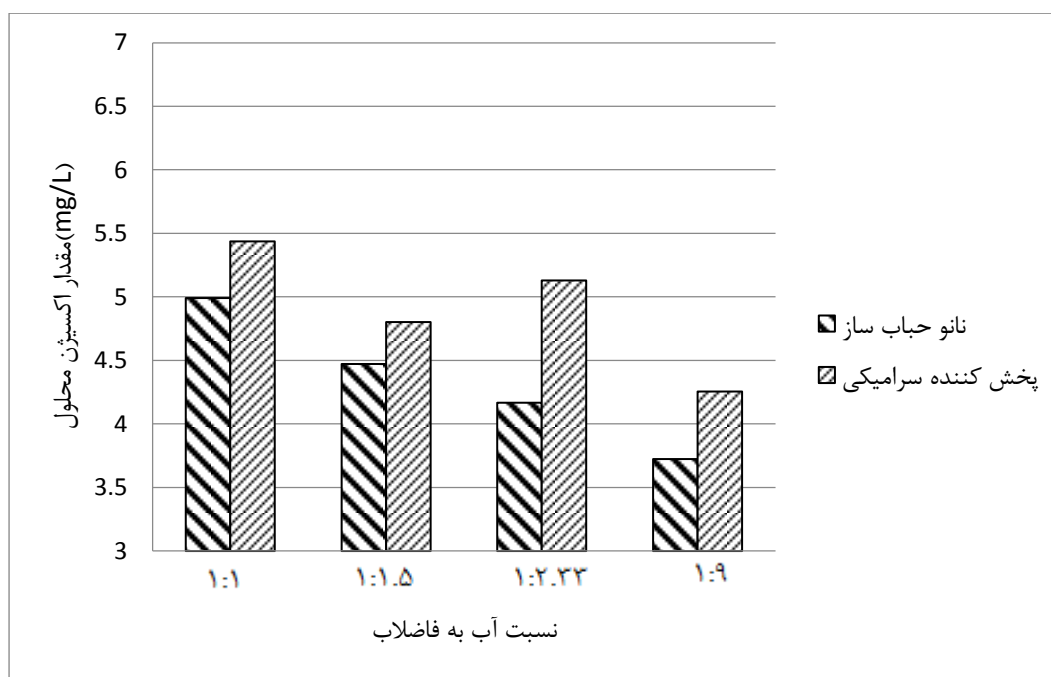
- مرحله اول بلافاصله پس از آماده سازی
- مرحله دوم بعد از ۴ ساعت زمان ماند

نتایج هر دو مرحله در نمودارهای ۴-۵ و ۴-۶ به صورت جداگانه آورده شده است.

با توجه به نتایج حاصل، مشاهده می شود که در تمام غلظت ها، اکسیژن محلول نمونه ها در حالتی که هوادهی توسط سیستم نانو حباب ساز انجام شده است بیشتر از حالتی است که هوادهی توسط سیستم پخش کننده سرامیکی منفذ ریز انجام شده است. با توجه به عملکرد بالاتر این سیستم در افزایش اکسیژن محلول این نتیجه کاملاً منطقی بوده و دور از انتظار نیست.



شکل ۴-۵: نمودار مقدار اکسیژن محلول (DO) در غلظت‌های مختلف بلافاصله بعد از آماده‌سازی



شکل ۴-۶: نمودار مقدار اکسیژن محلول (DO) در غلظت‌های مختلف چهار ساعت پس از آماده‌سازی

در مرحله دوم اندازه‌گیری، مقدار اکسیژن محلول تمام نمونه‌های حاوی میکرو-نانو حباب کمتر از مقدار اکسیژن محلول نمونه‌های معمولی به دست آمد.

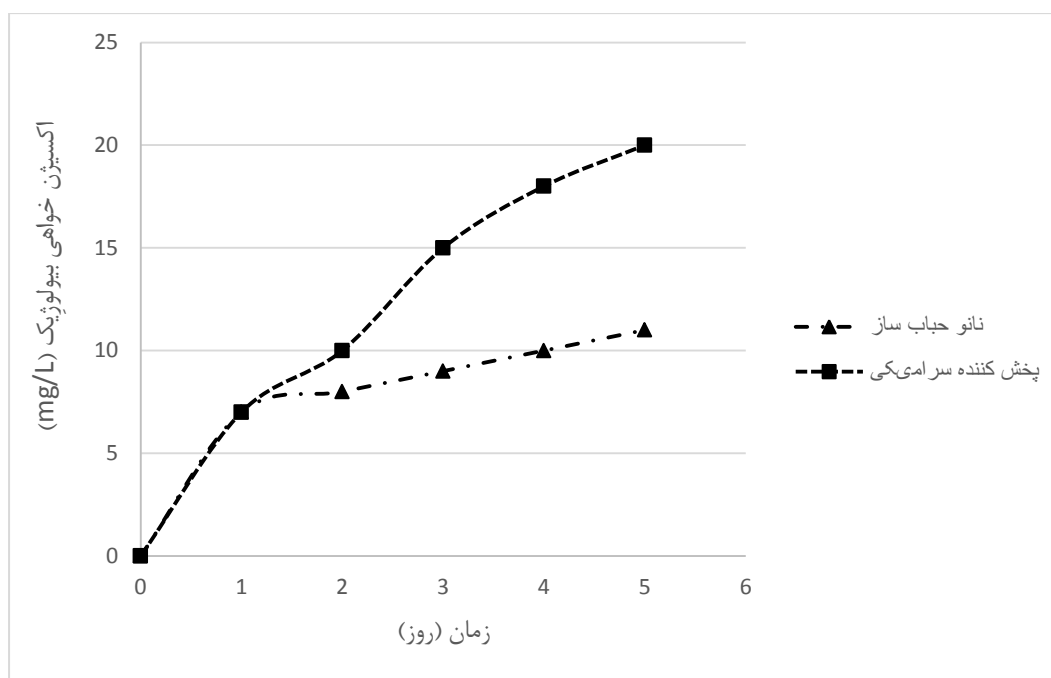
#### ۴-۶- مقدار اکسیژن خواهی بیولوژیک پنج‌روزه (BOD) در فاضلاب

بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش‌ها، نانو حباب‌ها و میکرو حباب‌ها توانایی حذف سریع‌تر و بیشتر شاخص آلودگی اکسیژن خواهی بیولوژیک را دارند.

نتایج حاصل از اندازه‌گیری میزان اکسیژن خواهی پنج‌روزه نمونه‌های آماده‌شده در نسبت‌های ۱:۱، ۱:۱.۲۵ و ۱:۱.۵ (آب به فاضلاب، در حجم یکسان یک لیتر برای تمام نمونه‌ها) به ترتیب در نمودارهای ۴-۷، ۴-۸ و ۴-۹ آورده شده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود در نمونه‌های با نسبت ۱:۱ (آب به فاضلاب)، میزان اکسیژن خواهی بیولوژیک پنج‌روزه برای نمونه‌های آماده‌شده با سیستم پخش‌کننده سرامیکی منفذ ریز، به‌طور میانگین برابر است با ۲۰ میلی‌گرم بر لیتر. این در حالی است که برای نمونه‌های حاوی نانو حباب (نانو سیال) میزان شاخص آلودگی اکسیژن خواهی بیولوژیک پنج‌روزه، به‌طور میانگین، با کاهش ۴۵ درصدی نسبت به نمونه‌های آماده‌شده با سیستم پخش‌کننده سرامیکی منفذ ریز به مقدار ۱۱ میلی‌گرم بر لیتر رسیده است.

درواقع یک ساعت هوادهی با سیستم معمول تحت شرایط محیطی حاکم (دمای اتاق و...) باعث کاهش حدوداً ۴۰ درصدی در میزان اکسیژن خواهی بیولوژیک شده است. این در حالی است که سیستم میکرو-نانو حباب تحت شرایط برابر توانایی کاهش ۶۶ درصدی میزان اکسیژن خواهی بیولوژیک را داشت.



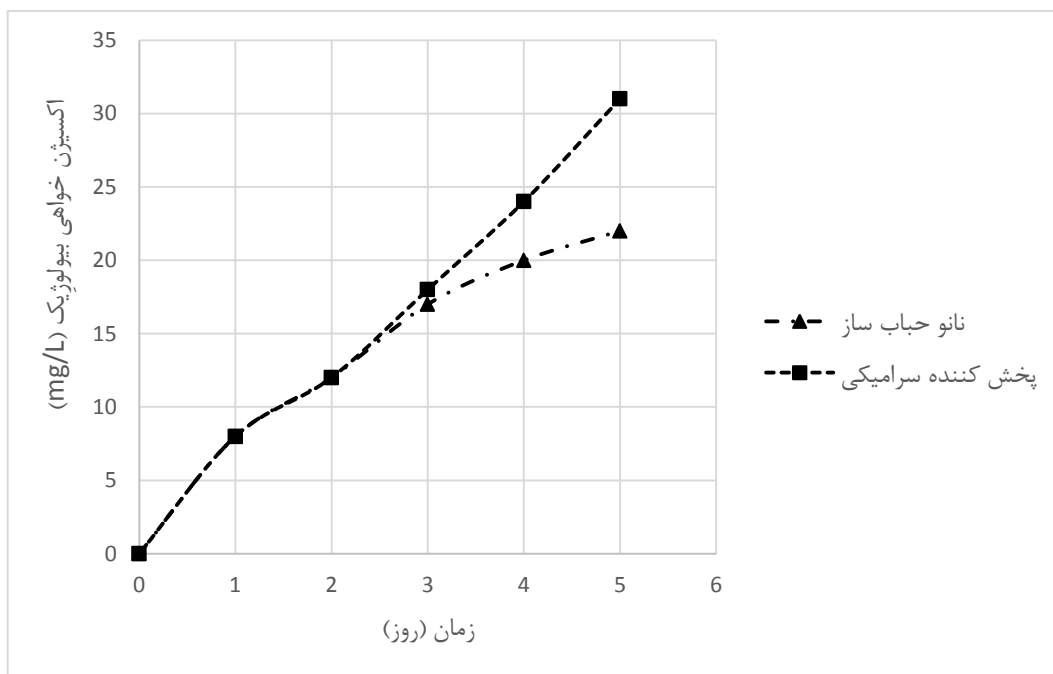
شکل ۴-۷: نمودار مقدار اکسیژن موردنیاز بیولوژیک ( $BOD$ ) در غلظت با نسبت ۱:۱ آب به فاضلاب

در نسبت‌های ۱:۱.۵ و ۱:۱.۲۵ نیز میزان شاخص آلودگی اکسیژن خواهی بیولوژیک پنج‌روزه برای نمونه‌های حاوی نانو حباب (نانو سیال) کاهش بیشتری در مقایسه با نمونه‌های هوادهی شده با سیستم پخش‌کننده سرامیکی منفذ ریز داشته است.

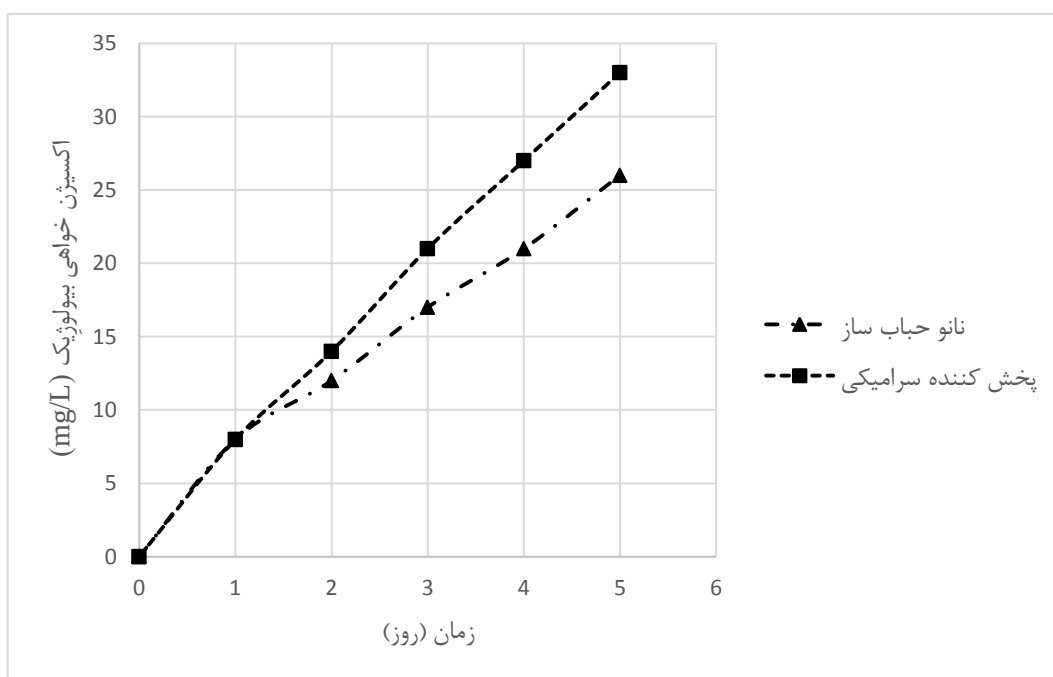
در نسبت ۱:۱.۲۵ آب به فاضلاب میزان شاخص آلودگی  $BOD_5$  برای نمونه‌های هوادهی شده با سیستم نانو حباب‌ساز به‌طور میانگین ۲۲ میلی‌گرم بر لیتر و برای نمونه‌های آماده‌شده با سیستم پخش‌کننده سرامیکی منفذ ریز ۳۱ میلی‌گرم بر لیتر به‌دست‌آمده است. در نسبت ۱:۱.۵ آب به فاضلاب میزان  $BOD_5$  برای نمونه‌های آماده‌شده با سیستم پخش‌کننده و نانو حباب‌ساز به ترتیب ۳۳ و ۲۶ میلی‌گرم بر لیتر به دست آمد.

هر چه نسبت آب به فاضلاب از ۱:۱ به ۱:۱.۵ می‌رسد یعنی درصد فاضلاب در نمونه افزایش می‌یابد بنابراین به طور کلی مقدار  $BOD_5$  افزایش می‌یابد و از طرفی  $BOD_5$  دو نمونه بیشتر به نزدیک می‌شوند چون درصد نانو حباب‌ها در واحد حجم نمونه کمتر می‌شود و تاثیر آنها بر کاهش  $BOD_5$  نسبت به نمونه دیگر کمتر می‌شود. نانو حباب‌ها و میکرو حباب‌ها به دلیل پایداری بیشتر و انحلال بیشتر گاز در مایع به جهت اندازه فوق‌ریز حباب، باعث افزایش اکسیژن محلول در فاضلاب شده و با ایجاد شرایط محیطی مناسب برای میکروارگانیسم‌ها سبب رشد بیشتر آنها و افزایش جمعیت میکروارگانیسم‌ها در فاضلاب می‌شوند. با

افزایش جمعیت میکروارگانیسم‌ها و مصرف بیشتر مواد آلی توسط میکروارگانیسم‌ها، کاهش بیشتر و سریع‌تر شاخص آلودگی  $BOD_5$  اتفاق می‌افتد. از طرفی دیگر سقوط و اضمحلال میکرو حباب‌ها به دلیل فشار داخلی بسیار زیاد، عاملی برای تجزیه مواد آلی شناخته شده است (Li et al., 2009).



شکل ۴-۸: مقدار اکسیژن مورد نیاز بیولوژیک ( $BOD$ ) در غلظت با نسبت ۱:۱.۲۵



شکل ۴-۹: نمودار مقدار اکسیژن مورد نیاز بیولوژیک ( $BOD$ ) در غلظت با نسبت ۱:۱.۵

#### ۴-۷- مقدار اکسیژن خواهی شیمیایی (COD) در فاضلاب

در این قسمت بررسی و تحلیل نتایج مقایسه دو سیستم نانو حباب ساز و سیستم پخش کننده سرامیکی بر تغییرات شاخص (پارامتر) اکسیژن خواهی شیمیایی در فاضلاب ورودی (فاضلاب خام)، برکه بی‌هوازی و برکه اختیاری (پساب خروجی) و تأثیر عامل زمان بر میزان اکسیژن خواهی شیمیایی انجام شده است.

##### ۴-۷-۱ بررسی تغییرات میزان اکسیژن خواهی شیمیایی در نمونه فاضلاب ورودی، برکه بی‌هوازی و برکه اختیاری

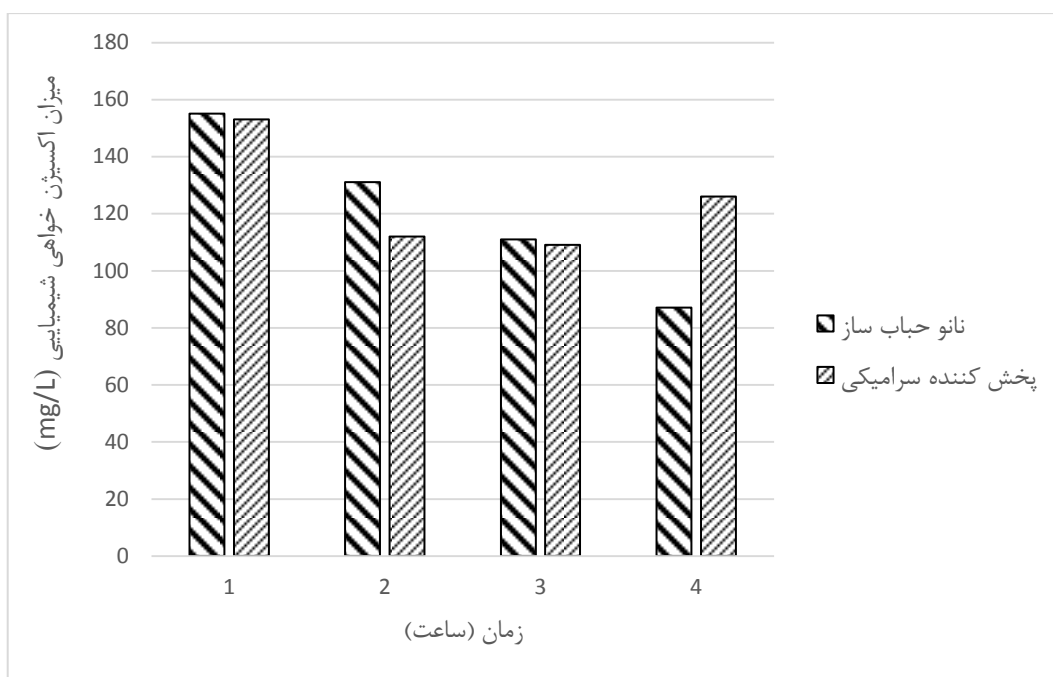
نتایج حاصل از آزمایش‌ها مربوط به میزان اکسیژن خواهی شیمیایی در بازه زمانی ۱ تا ۴ ساعت برای نمونه‌های گرفته شده از ورودی تصفیه‌خانه، برکه بی‌هوازی و برکه اختیاری با نسبت ۱:۱ به ترتیب در نمودارهای شماره ۴-۱۰، ۴-۱۱ و ۴-۱۲ آورده شده است.

همان‌طور که مشهود است برای فاضلاب ورودی در نمونه‌های حاوی نانو حباب، میزان اکسیژن خواهی شیمیایی در ساعت اول آماده‌سازی نمونه‌ها ۱۵۵ میلی‌گرم بر لیتر و در ساعت چهارم پس از آماده‌سازی نمونه‌ها مقدار ۸۷ میلی‌گرم بر لیتر گزارش گردیده است.

در نمونه‌های آماده شده با سیستم پخش کننده سرامیکی منفذ ریز این روند کاهشی برای میزان اکسیژن خواهی شیمیایی وجود دارد ولی با این تفاوت که میزان اکسیژن خواهی شیمیایی در ساعت اول آماده‌سازی به مقدار ۱۵۳ میلی‌گرم بر لیتر رسیده و در ساعت دوم به مقدار ۱۱۲ میلی‌گرم بر لیتر کاهش یافته است و در ساعت سوم تقریباً ثابت مانده و از ساعت سوم به بعد به دلیل رسیدن به مرحله مرگ میکروارگانیسم‌ها (باکتری‌های) به دلیل کاهش اکسیژن محلول و شرایط نامناسب رشد، باعث افزایش میزان اکسیژن خواهی شیمیایی شده است.

به‌عنوان یک نتیجه کلی میزان اکسیژن خواهی شیمیایی برای نمونه‌های حاوی نانو حباب با زمان نگهداری ۴ ساعت به مقدار ۸۷ میلی‌گرم بر لیتر و برای نمونه‌های آماده شده با سیستم پخش کننده سرامیکی منفذ ریز مقدار ۱۲۶ میلی‌گرم بر لیتر گزارش شده است. این بدان معناست که کاهش ۳۱ درصدی میزان اکسیژن

خواهی شیمیایی در نمونه‌های حاوی نانو حباب در مقایسه با نمونه‌های آماده‌شده با سیستم پخش‌کننده سرامیکی منفذ ریز نتیجه شده است.



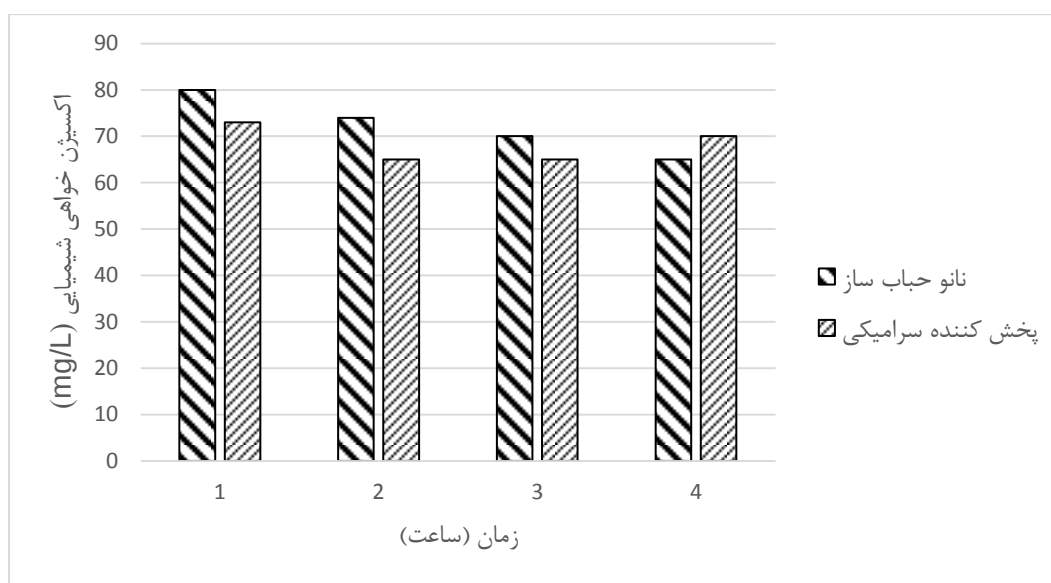
شکل ۴-۱: نمودار تغییرات COD نمونه‌های حاوی نانو حباب و آماده‌شده با پخش‌کننده سرامیکی با گذشت زمان برای فاضلاب ورودی (فاضلاب خام)

برای فاضلاب گرفته‌شده از برکه بی‌هوازی (فاضلابی که به دلیل شرایط محیطی حاکم در آن از لحاظ عمق برکه و ... به‌طور معمول میکروارگانیسم‌های بی‌هوازی فعال هستند) در نمونه‌های حاوی نانو حباب میزان اکسیژن خواهی شیمیایی از مقدار ۸۰ میلی‌گرم بر لیتر در ساعت اول اندازه‌گیری به میزان ۶۵ میلی‌گرم بر لیتر کاهش پیدا کرده است. این در حالی است که برای نمونه‌های آماده‌شده با سیستم پخش‌کننده سرامیکی منفذ ریز از مقدار ۷۳ میلی‌گرم بر لیتر به میزان ۷۰ میلی‌گرم بر لیتر کاهش یافته است. لازم به ذکر است که فاضلاب تهیه شده از برکه بی‌هوازی از عمق ۱.۵ متری برکه تهیه شده است و میزان COD آن قبل از آماده سازی و رقیق سازی با آب هوادهی شده و نانو سیال ۱۵۶ میلی‌گرم بر لیتر اندازه‌گیری شد. باید گفت میزان COD گزارش شده در برکه بی‌هوازی در جدول ۴-۱ مربوط به سربز (خروجی) برکه است.

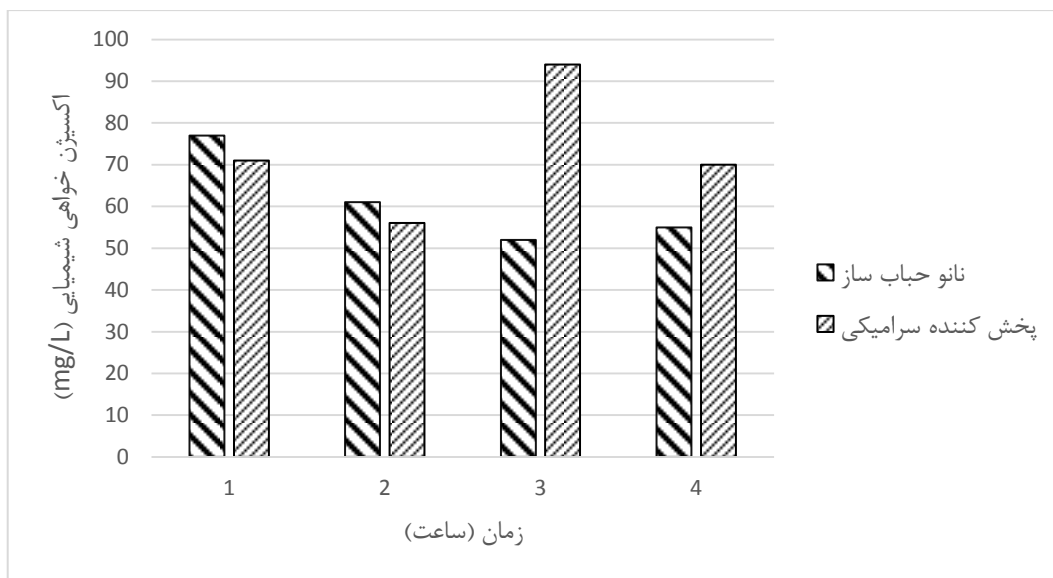
نتایج آزمایش‌ها اکسیژن خواهی شیمیایی نمونه‌های تهیه‌شده از فاضلاب برکه اختیاری (فاضلابی با میکروارگانیسم‌های هوازی و بی‌هوازی) نشان داد که در نمونه‌های حاوی نانو حباب میزان COD با گذشت

زمان کاهش یافته است. میزان COD در ساعت اول آماده‌سازی نمونه‌های حاوی نانو حباب ۷۷ میلی‌گرم بر لیتر و در ساعت چهارم آماده‌سازی نمونه‌ها به میزان ۵۵ میلی‌گرم بر لیتر کاهش یافته است.

روند تغییرات میزان COD با زمان برای نمونه‌های آماده‌شده با سیستم پخش‌کننده سرامیکی به دلیل ایجاد شرایط مناسب برای رشد میکروارگانیسم‌ها و به طبع آن مصرف بیشتر مواد آلی توسط میکروارگانیسم‌ها در ساعت اول و دوم آماده‌سازی نمونه‌ها روند کاهشی داشته و پس از آن با شروع مرگ میکروارگانیسم‌ها، افزایش میزان اکسیژن خواهی شیمیایی در نمونه‌های مورد اندازه‌گیری، نتیجه شد.



شکل ۴-۱۱: نمودار تغییرات COD نمونه‌های حاوی نانو حباب و آماده‌شده با پخش‌کننده سرامیکی با گذشت زمان برای فاضلاب تهیه‌شده از برکه بی‌هوای



شکل ۴-۱۲: نمودار تغییرات COD نمونه‌های حاوی نانو حباب و آماده‌شده با پخش‌کننده سرامیکی با گذشت زمان برای نمونه فاضلاب تهیه‌شده از برکه اختیاری

به‌عنوان تحلیلی بر این نتایج می‌توان بیان کرد که به‌طور کلی برای تمام نمونه‌ها (نمونه‌های گرفته‌شده از ورودی تصفیه‌خانه، برکه بی‌هوای و برکه اختیاری) در نمونه‌های حاوی نانو حباب به دلیل ایجاد شرایط محیطی مناسب برای رشد میکروارگانیسم‌ها (هوای) به جهت پایداری طولانی‌تر میکرو حباب‌ها و نانو حباب و تأمین اکسیژن محلول بیشتر با میکرو حباب‌ها و نانو حباب‌ها، کاهش بیشتری در مقایسه با نمونه‌های آماده‌شده با سیستم پخش‌کننده سرامیکی داشته است.

دلیل دیگری که می‌توان بیان کرد برای این مسئله (کاهش بیشتر میزان اکسیژن خواهی شیمیایی نمونه‌های حاوی نانو حباب در مقایسه با نمونه‌های آماده‌شده با سیستم پخش‌کننده منفذ ریز سرامیکی) تولید رادیکال‌های آزاد در نمونه‌های حاوی میکرو حباب و نانو حباب است که بسیار اکسنده است و تجزیه مواد آلی را سبب می‌شود.

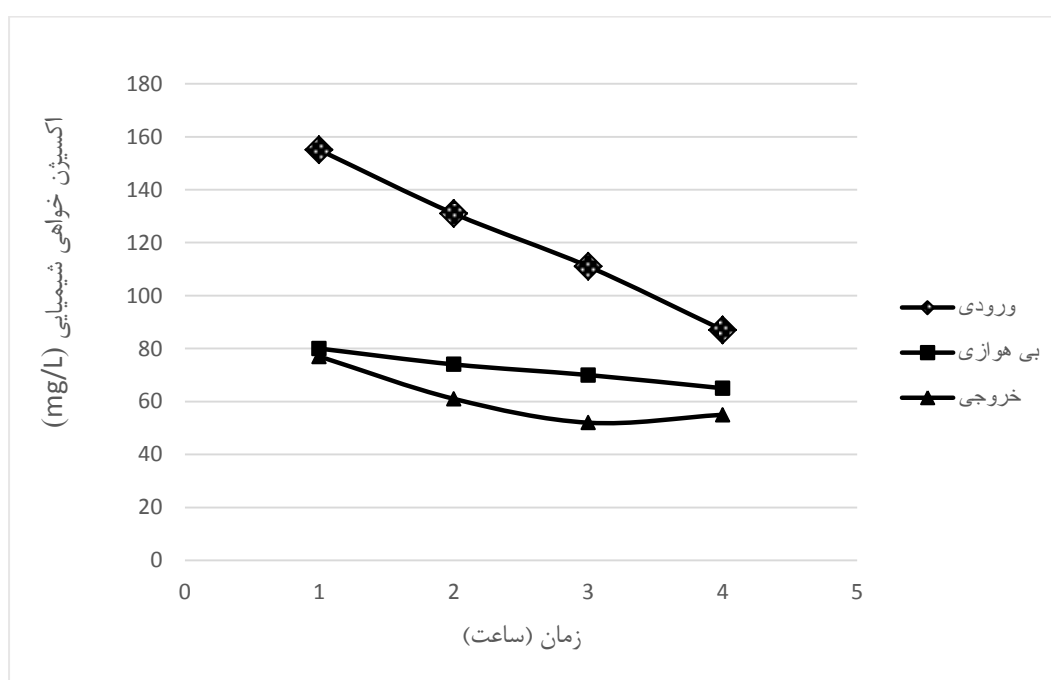
#### ۴-۷-۲ بررسی تأثیر عامل زمان بر میزان اکسیژن خواهی شیمیایی

نتایج حاصل از آزمایش‌ها در نمونه‌های حاوی نانو حباب نشان داد که با گذشت زمان میزان اکسیژن خواهی شیمیایی کاهش می‌یابد. بیشترین نرخ کاهش در فاضلاب خام (فاضلاب ورودی) به‌دست آمده است.

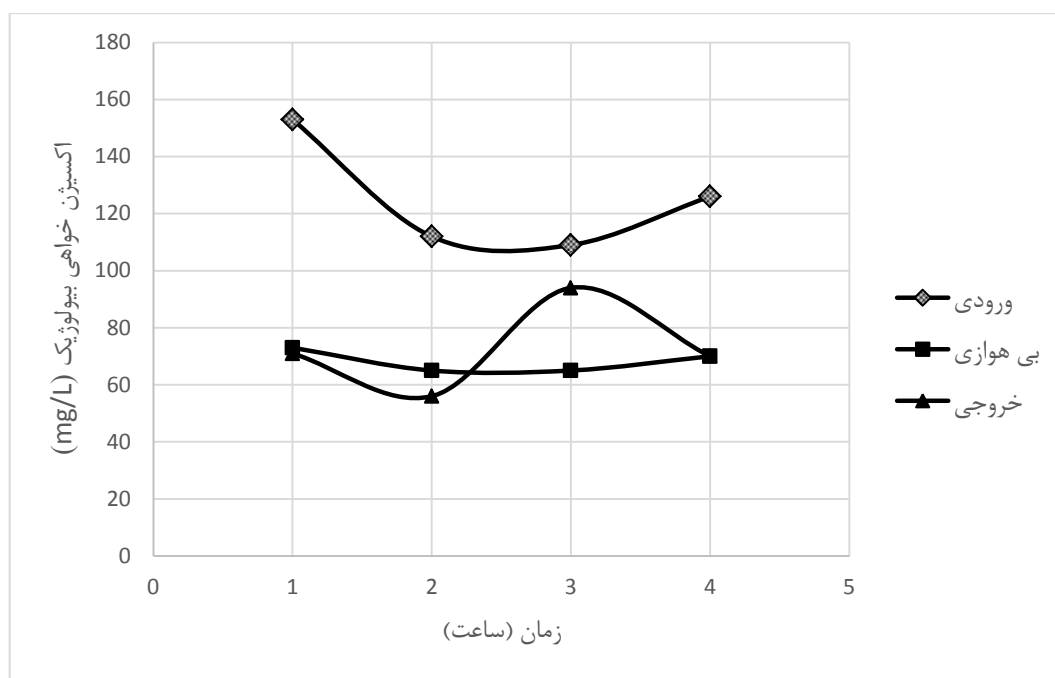
در نمونه‌های آماده‌شده با سیستم پخش‌کننده سرامیکی تغییرات میزان اکسیژن خواهی شیمیایی در ساعت‌های اولیه آزمایش به دلیل وجود شرایط رشد مناسب از لحاظ تأمین اکسیژن برای میکروارگانیسم‌ها،

روند کاهشی داشته و پس از آن به دلیل کمبود اکسیژن محلول در طول دوره نگهداری نمونه‌ها (۴ ساعت) و ایجاد شرایط نامناسب برای میکروارگانیسم‌ها و شروع مرگ آن‌ها به تدریج میزان اکسیژن خواهی شیمیایی افزایش می‌یابد.

در شکل‌های ۴-۱۳ و ۴-۱۴، به ترتیب میزان تغییرات اکسیژن خواهی شیمیایی با زمان در نمونه‌های تهیه‌شده از ورودی، برکه بی‌هوازی و برکه اختیاری برای نمونه‌های حاوی نانو حباب و نمونه‌های آماده‌شده با سیستم پخش‌کننده سرامیکی به صورت مجزا آورده شده است.



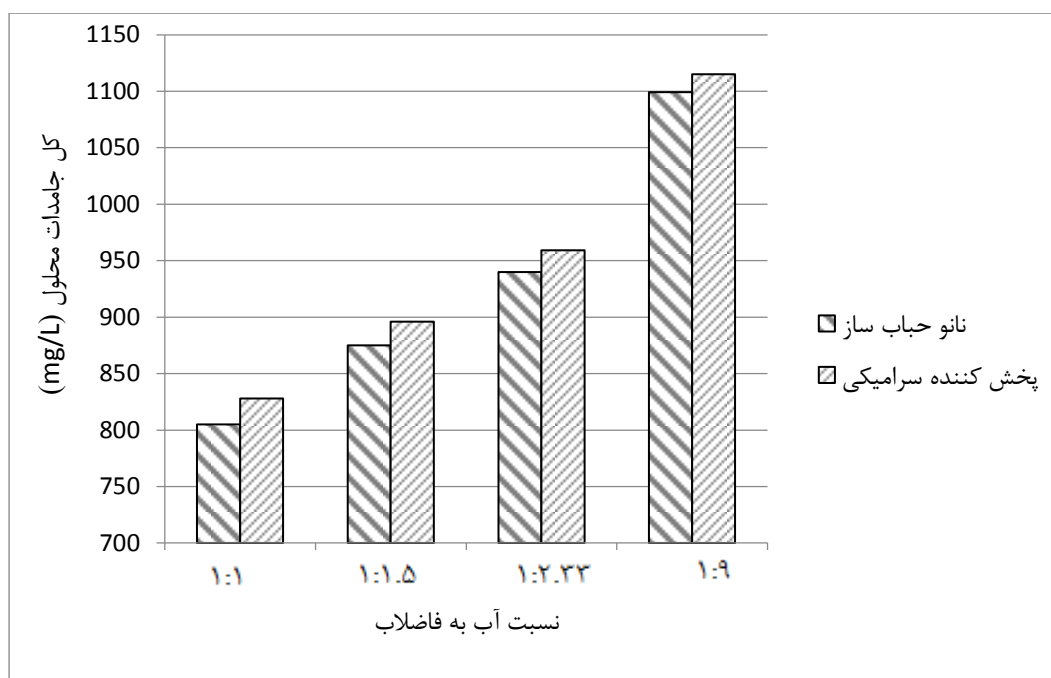
شکل ۴-۱۳: نمودار تغییرات اکسیژن خواهی شیمیایی با زمان برای نمونه‌های حاوی نانو حباب



شکل ۴-۱۴: نمودار تغییرات اکسیژن خواهی شیمیایی با زمان برای نمونه‌های آماده‌شده با سیستم پخش‌کننده سرامیکی

#### ۴-۸- مقدار کل جامدات محلول (TDS)

میکرو حباب‌ها و نانو حباب‌ها می‌توانند عاملی برای تجزیه مواد آلی باشند و از آنجاکه کل جامدات محلول مجموع جامدات محلول آلی و معدنی است، لذا میکرو - نانوحباب‌ها عاملی برای کاهش TDS شناخته می‌شوند. نتایج حاصل نیز، این ادعا را ثابت می‌کند. همان‌طور که در نمودار ۴-۱۵ آورده شده است. مقدار TDS در تمام نمونه‌های فاضلاب حاوی میکرو-نانو حباب کمتر از حالت معمولی است ولی باید گفت که میزان اختلاف در مقدار کل جامدات محلول در دو نمونه فاضلاب بسیار اندک است و می‌توان گفت که تفاوت چندانی ندارند.

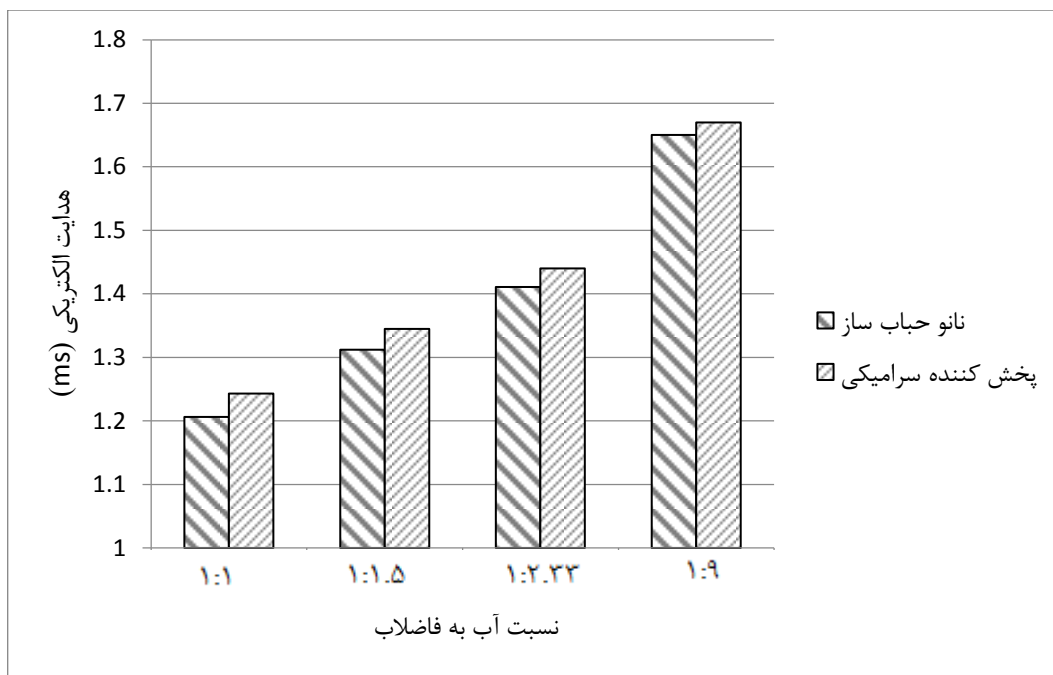


شکل ۴-۱۵: نمودار مقایسه سیستم نانو حباب ساز و پخش کننده سرامیکی در مقدار TDS، ۴ ساعت پس از آماده سازی نمونه ها

#### ۴-۹- مقدار هدایت الکتریکی (EC)

با توجه به نتایج آزمایش ها، مشخص گردید که میزان هدایت الکتریکی در تمام نمونه های حاوی نانو حباب در مقایسه با نمونه های آماده شده با سیستم پخش کننده سرامیکی منفذ ریز کمتر است. دلیل این مسئله اکسیداسیون بیشتر مواد موجود در فاضلاب به کمک نانو حباب ها و میکرو حباب ها در مقایسه با حباب های معمولی است که سبب کاهش بیشتر هدایت الکتریکی در فاضلاب می شود ولی باید گفت که میزان اختلاف در مقدار هدایت الکتریکی در دو نمونه فاضلاب بسیار اندک است و می توان گفت که تفاوت چندانی ندارند.

نتایج حاصل از آزمایش های میزان هدایت الکتریکی در نمودار ۴-۱۶ آورده شده است.

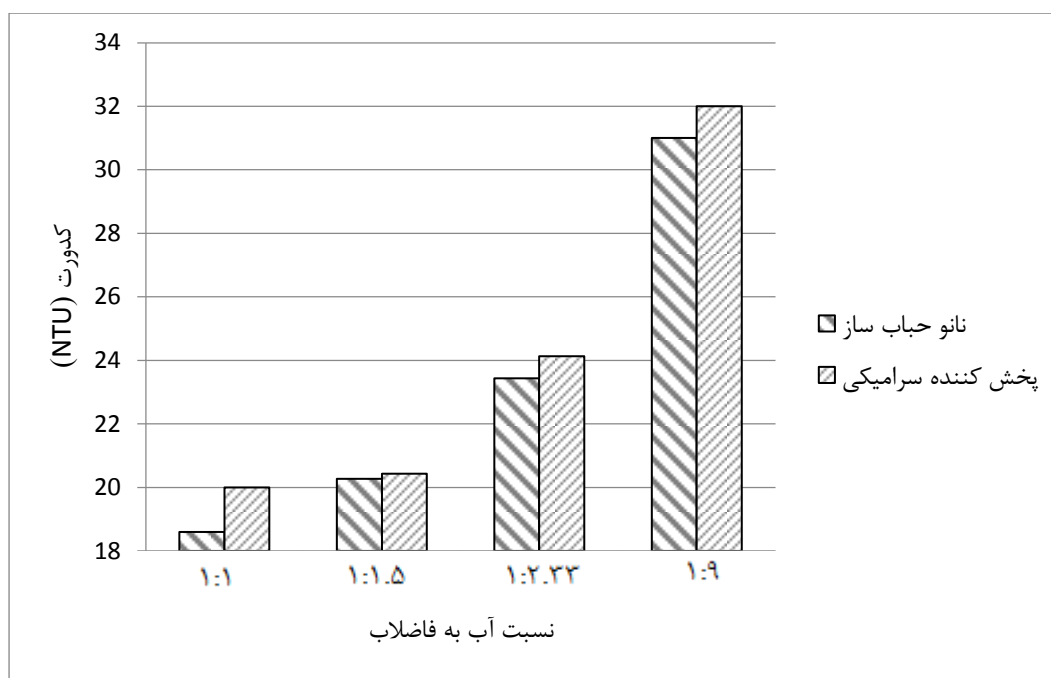


شکل ۴-۱۶: نمودار مقایسه سیستم نانو حباب ساز و پخش کننده سرامیکی در تغییرات (EC) در نسبت های مختلف آب به فاضلاب

#### ۴-۱۰- مقدار کدورت

حباب ها عمل حذف ذرات ریز را از آب به وسیله چسبیدن ذرات به حباب انجام می دهند (Li and Tsuage, 2006). هرچه قطر حباب ها کمتر باشد بازده این فرآیند بیشتر می شود (Tsai et al, 2007). حذف ذرات معلق از محلول باعث کاهش کدورت آن می شود. نتایج حاصل از اندازه گیری کدورت نمونه ها نشان داد که میزان کدورت در تمام نمونه های حاوی نانو سیال (نانو حباب) کمتر از نمونه های معمولی است. میکرو حباب ها و نانو حباب ها به دلیل داشتن سطح باردار سبب جذب ذرات باردار معلق در مایع شده و با اجتماع آن ها سبب رسوب کردن این ذرات می شوند. این امر سبب کاهش میزان کدورت در مایع می شود. باید بیان کرد که میزان اختلاف در مقدار کدورت دو نمونه زیاد نیست.

نتایج حاصل از آزمایش ها، در نمودار ۴-۱۷ ارائه شده است.



شکل ۴-۱۷: نمودار تغییرات میزان کدورت در نسبت‌های مختلف آب به فاضلاب

شایان ذکر است که میزان تغییرات  $pH$  نیز در نسبت‌های مذکور اندازه‌گیری شد که تفاوت قابل ذکر مشاهده نشد.



## فصل ۵ نتیجه‌گیری و پیشنهادها

## ۵-۱- مقدمه

در این فصل به عنوان جمع بندی نتیجه گیری حاصل از تحقیق انجام شده، بیان می شود. در ادامه پیشنهادهایی برای محققین دیگر برای تکمیل و ادامه این تحقیق ارائه می شود.

## ۵-۲- نتیجه گیری

نتایج کلی حاصل از این تحقیق به صورت زیر خلاصه می گردد:

- با توجه به آزمایش ها انجام شده بر روی فاضلاب شهری، تصفیه خانه فاضلاب شاهرود در زمان های مختلف در بازه های یک ماهه، مشخص گردید که فاضلاب شهری شهر شاهرود، فاضلابی ضعیف است.
- با توجه به اینکه در حال حاضر معادل ۱۵ الی ۲۵ درصد از جمعیت طراحی تصفیه خانه به شبکه جمع آری فاضلاب، متصل هستند، لذا زمان نگهداری فاضلاب در برکه ها به دلیل پایین بودن حجم ورودی به تصفیه خانه، بالا است. به عنوان مثال مدت زمان نگهداری فاضلاب در برکه بی هوای ۴۵ روز و در برکه اختیاری ۶۲ روز محاسبه شد.
- با چنین شرایطی میزان کاهش  $BOD_5$  در برکه بی هوای ۶۰ درصد و در سرریز برکه اختیاری ۶۹ درصد است. در حقیقت فاضلاب با  $BOD_5$  برابر ۱۷۰ میلی گرم بر لیتر پس از سپری کردن زمان مذکور در خروجی دارای،  $BOD_5$  برابر با ۲۱ میلی گرم بر لیتر است که این میزان بر اساس استاندارد، برای تخلیه آب های زیرزمینی مناسب است.
- در مقایسه عملکرد ۲ سیستم نانو حباب ساز و پخش کننده سرامیکی، مشخص شد که میزان ضریب حجمی انتقال اکسیژن  $KLa$  برای سیستم نانو حباب ساز، تقریباً ۷ برابر بیشتر از سیستم پخش کننده سرامیکی منفذ ریز است.
- توزیع ابعادی حباب های تولید شده توسط سیستم نانو حباب، نشان داد که میانگین قطر کوچک ترین حباب ۲۱ نانومتر است.
- به دلیل فشار داخلی بالای میکرو حباب ها و نانو حباب ها، انحلال گاز در مایع برای میکرو حباب ها و نانو حباب ها افزایش می یابد. بر اساس آزمایش ها مشخص گردید که میزان اکسیژن محلول در آب

- تمیز، در سیستم نانو حباب‌ساز بعد از ۳۰ دقیقه از ۴/۵ میلی گرم بر لیتر به ۸/۹ میلی گرم بر لیتر رسیده است ولی در سیستم پخش کننده سرامیکی منفذ ریز به میزان ۵/۷ میلی گرم بر لیتر رسیده است؛ که این موضوع عملکرد بالای سیستم نانو حباب را در تأمین اکسیژن در مایعات نشان می دهد.
- پایداری طولانی مدت میکرو حباب ها و نانو حباب ها در آب باعث شد که نرخ کاهش اکسیژن محلول در نانو سیال (آب حاوی نانو حباب)، نسبت به آب هوادهی شده با سیستم پخش کننده سرامیکی منفذ ریز، بعد از توقف هوادهی، بسیار اندک باشد. به نحوی که با توقف سیستم هوادهی پخش کننده سرامیکی منفذ ریز میزان اکسیژن محلول پس از حدود ۳ ساعت، به مقدار اولیه خود یعنی ۴/۵ میلی گرم بر لیتر رسیده است، درحالی که میزان اکسیژن محلول در نانو سیال حاوی نانوحباب، با گذشت ۵۱ ساعت، به میزان ثابت شده ۶/۵ میلی گرم بر لیتر رسیده است.
  - آزمایش ها نشان دادند که در نمونه های آماده شده آب به فاضلاب با نسبت های مختلف ۱:۱، ۱:۱/۵، ۱:۲/۳۳، ۱:۴، ۱:۹، با گذشت ۴ ساعت از زمان آماده سازی نمونه ها، مصرف اکسیژن محلول توسط میکروارگانیزم های هوازی در نمونه های حاوی نانو حباب بیشتر از نمونه های آماده شده با سیستم پخش کننده سرامیکی منفذ ریز است.
  - میکرو حباب ها و نانو حباب ها به دلیل ایجاد شرایط محیطی مناسب برای رشد میکروارگانیزم ها (تأمین اکسیژن محلول مورد نیاز سوخت و ساز)، سبب تجزیه سریع تر و بیشتر مواد آلی موجود در فاضلاب می شوند.
  - برای یک نمونه فاضلاب یکسان برای نمونه حاوی نانو حباب و میکرو حباب، در مقایسه با نمونه آماده شده با سیستم پخش کننده سرامیکی، ۴۵ درصد کاهش بیشتر میزان اکسیژن خواهی بیولوژیک ۵ روزه گزارش گردید.
  - با توجه به اضمحلال میکرو حباب ها و به سبب آن تجزیه مواد آلی پیچیده و همچنین مصرف بیشتر مواد آلی توسط میکروارگانیزم ها، میزان شاخص COD در تمام نمونه ها (نمونه های تهیه شده از ورودی تصفیه خانه، برکه هوازی، برکه اختیاری و یا خروجی تصفیه خانه) با گذشت ۴ ساعت از شروع آماده سازی آن ها، در نمونه های حاوی نانو حباب کاهش بیشتری در مقایسه با نمونه های آماده شده با

پخش کننده سرامیکی منفذ ریز داشته است. به عنوان بهترین نتیجه در فاضلاب ورودی، نمونه های حاوی نانوحباب در مقایسه با نمونه های آماده شده با سیستم پخش کننده سرامیکی، بعد گذشت ۴ ساعت از آماده سازی نمونه ها، ۳۱ درصد کاهش بیشتر در میزان اکسیژن خواهی شیمیایی را سبب شده اند.

- در ادامه مشخص گردید که با گذشت زمان (۱ تا ۴ ساعت)، میزان شاخص آلودگی اکسیژن خواهی شیمیایی در نمونه های حاوی نانو حباب، نرخ کاهش به صورت خطی را دنبال می کند.
- میکرو حباب ها و نانو حباب ها می توانند به عنوان عاملی برای تجزیه مواد آلی باشند و از آنجا که کل جامدات محلول، مجموع جامدات آلی و معدنی است، لذا میکرو حباب ها و نانو حباب ها سبب کاهش کل جامدات محلول می شوند.
- حباب ها عمل حذف ذرات ریز را از آب به وسیله چسبیدن ذرات به حباب انجام می دهند (Li and Tsuage, 2006). هرچقدر قطر حباب ها کمتر باشد بازده این فرآیند بیشتر می شود (Tsai et al, 2007). حذف ذرات معلق از محلول باعث کاهش کدورت آن می شود. نتایج حاصل از اندازه گیری کدورت نمونه ها نشان داد که میزان کدورت در تمام نمونه های حاوی نانو سیال (نانو حباب) کمتر از نمونه های معمولی است.
- میکرو حباب ها و نانو حباب ها به دلیل داشتن سطح باردار سبب جذب ذرات باردار معلق در مایع شده و با اجتماع آنها سبب رسوب کردن این ذرات می شوند. این امر سبب کاهش میزان کدورت د مایع می شود.
- با انجام آزمایش ها مشخص گردید که میزان pH در نمونه های فاضلاب آماده شده با سیستم نانو حباب ساز و نمونه های آماده شده یا سیستم پخش کننده سرامیکی منفذ ریز، تفاوت چندانی باهم ندارند.

## ۵-۳- پیشنهادها

در این بخش با توجه به مطالعات صورت گرفته و آزمایش‌های انجام‌شده، مواردی به جهت راهنمایی محققین علاقه‌مند برای توسعه و تکمیل تحقیق انجام‌شده، پیشنهاد می‌شود:

- طراحی و ساخت مولد میکرو حباب و نانو حباب که قابلیت پیاده‌سازی در پیلوت سیستم لجن فعال را داشته باشد.
- بررسی عملکرد سیستم نانو حباب‌ساز در پیلوت لجن فعال به صورت عملی و اجرایی
- بررسی اثر میکرو حباب و نانو حباب‌ها بر بهبود تصفیه فاضلاب صنایع مختلف از قبیل صنعت نساجی، صنعت پتروشیمی و صنعت داروسازی
- بررسی اثر میکرو حباب‌ها و نانو حباب‌ها بر تغییرات میکروبیولوژی (نوع و جمعیت) میکروارگانیسم‌های موجود در فاضلاب شهری
- بررسی کاربرد همزمان نانوحباب و نانو مواد با هدف حذف بیشتر مواد سمی خطرناک در فاضلاب‌های صنعتی
- بررسی عملکرد نانو حباب‌ها و میکرو حباب‌ها در کاهش میزان فلزات سنگین از آب یا پساب‌های آلوده به فلزات سنگین خطرناک
- بررسی کارایی همزمان سیستم نانو حباب‌ساز و گیاه‌پالایی به جهت حذف شاخص‌های آلودگی در فاضلاب شهری

## منبع‌ها

- ابراهیمی د، (۱۳۹۴) "آب، فاضلاب و تصفیه" یزدا، تهران.
- ابریشم چی آ، افشار ع، (۱۳۸۵) "مهندسی فاضلاب" انتشارات نشر دانشگاهی، تهران.
- ایزائلو ح، تکدستان آ، ززولی م و ماروسی م، (۱۳۸۷) "تصفیه فاضلاب مفاهیم و روش‌های طراحی" انتشارات دانشگاه علوم پزشکی و خدمات درمانی قم، قم.
- ترکیان آ و احمدی م، (۱۳۸۵) "بیوتکنولوژی زیست‌محیطی" انتشارات دانشگاه صنعتی شریف، تهران.
- ترکیان آ و جعفر زاده م، (۱۳۸۰) "تصفیه فاضلاب‌های صنعتی" انتشارات شرکت شهرک‌های صنعتی، تهران.
- خرسندی ح، عزیزاده ر، طوسی نژاد ح و پور غفار ه، (۱۳۹۳) "بررسی تأثیر اکسیژن‌خواهی نیتروژنی و جلبکی در ارزیابی کیفیت پساب خروجی از لاگون‌های با هوادهی" مجله آب و فاضلاب، شماره ۲، صفحه ۷۷-۸۴.
- رحیمی ی، میرزایی ن و مهدوی م، (۱۳۸۸) "تصفیه فاضلاب در کشورهای در حال توسعه" انتشارات تحفه، تهران.
- علوی مقدم س و صدری مقدمش، (۱۳۹۲) "تصفیه فاضلاب مفاهیم روش‌های فیزیکی و شیمیایی تصفیه" انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران.
- لیلیم، سمائی م و دهستانی س، (۱۳۸۹) "مدیریت فاضلاب شهری در کشورهای در حال توسعه" اندیشه رفیع، تهران.
- محو ی آ ح، گلستانی فر ح، شیر مردی م و پرستار س، (۱۳۹۴) "سیستم‌های وتلند برای کنترل رواناب شهری" نشر دانشگاهی فرهمند، تهران.
- منزوی م. ت، (۱۳۸۵) "فاضلاب شهری" انتشارات دانشگاه تهران، تهران.
- موسوی غ، فرزاد کیا م، جعفر زاده ن، جرفی س و محمودی س، (۱۳۸۸) "مهندسی فاضلاب تصفیه و استفاده مجدد" خانیان، تهران.

مهردادی ن، محمدی اقدم ع، آقاجانی یاسینی آ و نبی هندی غ، (۱۳۹۱) "کاربرد سیستم انتشار/مواج

اولتراسونیک در تصفیه فاضلاب" انتشارات دانشگاه تهران، تهران.

میقانی ل، (۱۳۸۰)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد: "بررسی کارایی استفاده از روش FAS در مقیاس پایلوت

جهت تصفیه فاضلاب شهری"، دانشکده بهداشت و انستیتو تحقیقات بهداشتی، دانشگاه علوم پزشکی تهران.

ندافی ک و نبی زاده ر، (۱۳۷۵) "برک‌های تثبیت فاضلاب اصول طراحی و اجرا" انتشارات نص، تهران.

نوری ن.م، سررشته‌داری ع و سخاوت س، (۱۳۸۹)، "مروری بر تحقیقات و دستاوردها در پدیده کاهش

دراگ اصطکاکی به‌وسیله تزریق میکرو حباب"، نهمین همایش صنایع دریایی، مازندران.

یزدان بخش آ، لیلیم و کولیوند ع، (۱۳۸۶) "تصفیه فاضلاب (فرآیندهای فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیک)"

نشر حفیظ، قم.

Agarwal A., Jern Ng W. and Liu Y. (2011). Principle and applications of microbubble and nanobubble technology for water treatment. Chemosphere 84, 1175–118.

Atkins P. and de Paula J. (2006). Atkins Physical Chemistry. Oxford University Press, oxford 8th edition.

Chakinala A.G., Gogate P. R., Burgess, A. E. and Bremner, D. H. (2007). Treatment of industrial wastewater effluents using hydrodynamic cavitation and the advanced Fenton process. Ultrasonics Sonochemistry. 15, 49–54.

Chu L. B., Xing X. H., Yu A. F., Sun X. L. and Jurcik B. (2008). Enhanced treatment of practical textile wastewater by microbubble ozonation. Process Safety and Environment Protection. 86(5):389-393.

Clift R., Grace, J. R., and Weber, M. E. (2005). Bubbles, Drops and particles. Dover Mineola. publications,

EPA Guidelines, Regulatory monitoring and testing Water and wastewater sampling, (2007). USA.

Fujiwara A. (2006). Microbubble generation using venture tube. ECO Industry, 11, 27-30.

Fujiwara A., Takagi S., Watanabe K. and Matsumoto Y. (2003). Experimental study on the new micro-bubble generator and its application to water purification system. 4th Proceeding of the ASME/SME. Honolulu, United States.

- Gotoh Y., Serizawa A., Eguchi T., Tanaka H. and Lzumi M. (2006). Oil separation from oil polluted soil by micro bubble injection and separation mechanisms. *Japanese Journal of Multiphase Flow*. 20(1):39- 49.
- Han M., Park Y., Lee j. and Shim j. (2002). Effect of Pressure on bubble size in dissolved air flotation. *Water Sci. & Tech.; Water Supply*. 2, 41-46.
- Jigneshkumar I. B. (2015). Treatability study of pharmaceutical wastewater by hydrodynamic cavitation process. *International Journal of Engineering Research and General*. Volume 3, Issue 3.
- Kawahara A., Sadatomi M., Sakaeda S. and Tomoaki Iwashita T., (2012) “Water purification by using micro-bubbles and block materials containing aerobic bacterium”, *International Association of Management Science and Engineering Technology*. Volume: 80
- Li P. and Tsuge H. (2006). Water treatment by induced air flotation microbubbles. *Journal of Chemical Engineering of Japan*. 39(8):896-903.
- Li P., Takahashi M., Chiba k., (2009). Degradation of phenol by the collapse of microbubbles. *Chemosphere*. 75: 1371-1375.
- in Aqueous Solution Sulfoxide Li P., Tsuge H. and Itoh K. (2009). Oxidation of Dimethyl Using Microbubbles. *Ind. Eng. Chem. Res*. 48, 8048-8053.
- 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, 337–346.
- Millero F.J. (2001). *The Physical Chemistry of Natural Waters*. Wiley – Interscience, New York.
- Renou S., Givaudan J.G., Poulain S. and Dirassouyan F., (2008). Landfill Leachate Treatment: Review and Opportunity. *Journal of Hazardous Materials*. 150(3):468-93.
- Serizawa A., Inui T., Yahiro T., and Kawara Z. (2003). Laminarization of micro-bubble containing milky bubbly flow in a pipe. In *Proceedings of the 3rd European-Japanese Two-Phased Flow Group Meeting*, September, Certosa di Pontingnano, Italy.
- Takahashi M. (2005). Zeta potential of microbubbles in aqueous solutions: Electrical properties of the gas-water interface. *Journal of Physical Chemistry B*. 190(46):21858-21864.
- Takamura F. (2004). *Course of Characteristics and Application of Microbubblee*, Technical Information Center.
- Terasaka K. and Tsuge H. (1990). Bubble formation at a single orifice in highly viscous liquids. *J. Chem. Eng. Japan*. 23, 160-165.

- Terasaka K., Hirabayashi A., Nishino T., Fujioka S. and Kobayashi D. (2011). Development of microbubble aerator for waste water treatment using aerobic activated sludge. *Chemical Engineering Science*. 66, 3172–3179.
- Tsai J., Kumar M., Chen S. and Lin J. (2007). Nano-bubble flotation technology with coagulation process for the cost-effective treatment of chemical mechanical polishing wastewater. *Separation and Purification Technology*. 58, 61–67.
- Tsai J., Kumar M., Chen S. and Lin J. (2007). Nano-bubble flotation technology with coagulation process for the cost-effective treatment of chemical mechanical polishing wastewater. *Separation and Purification Technology*. 58(1):61-67.
- Tsuge H. (1986). Hydrodynamics of bubble formation from submerged orifices, *Encyclopedia of fluid mechanics*, Gulf Publishing Company, pp. 191-232.
- bubbles, chapter 1: bubbles and nano Tsuge H. (2007). The latest technology on micro bubbles). 1-14. CMC, Tokyo. Maikurobaburu no tokusei (Special characteristics of micro bubbles).
- Tsuge H. (2014). *Micro- and Nanobubbles Fundamentals and Applications*. Pan Stanford Publishing. Printed in the USA.
- Vlyssides A. G., Mai S. T. and Barampouti E.M.P. (2004). Bubbles size distribution formed by depressurizing air-saturated water, *Ind. Eng. Chem. Res.* 43, 2775-2780.
- Zheng T., Wang Q., Zhang T., Shi Z., Tian Y., Shi S., Smale N. and Wanga J., (2015). Microbubble enhanced ozonation process for advanced treatment of wastewater produced in acrylic fiber manufacturing industry. *Journal of Hazardous Materials*. 287: 412–420.



پیوست حلالیت اکسیژن در آب

## Solubility of oxygen in water at various temperatures and pressures

| Temp<br>°C | Atmospheric pressure, in millimeters of mercury |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|------------|-------------------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|            | 795                                             | 790  | 785  | 780  | 775  | 770  | 765  | 760  | 755  | 750  | 745  | 740  | 735  | 730  | 725  | 720  | 715  | 710  | 705  | 700  |
| 0.0        | 15.3                                            | 15.2 | 15.1 | 15.0 | 14.9 | 14.8 | 14.7 | 14.6 | 14.5 | 14.4 | 14.3 | 14.2 | 14.1 | 14.0 | 13.9 | 13.8 | 13.7 | 13.6 | 13.5 | 13.4 |
| 0.5        | 15.1                                            | 15.0 | 14.9 | 14.8 | 14.7 | 14.6 | 14.5 | 14.4 | 14.3 | 14.2 | 14.1 | 14.0 | 13.9 | 13.8 | 13.7 | 13.6 | 13.5 | 13.4 | 13.3 | 13.2 |
| 1.0        | 14.8                                            | 14.7 | 14.7 | 14.6 | 14.5 | 14.4 | 14.3 | 14.2 | 14.1 | 14.0 | 13.9 | 13.8 | 13.7 | 13.6 | 13.5 | 13.4 | 13.3 | 13.2 | 13.2 | 13.1 |
| 1.5        | 14.6                                            | 14.5 | 14.5 | 14.4 | 14.3 | 14.2 | 14.1 | 14.0 | 13.9 | 13.8 | 13.7 | 13.6 | 13.5 | 13.4 | 13.3 | 13.2 | 13.2 | 13.1 | 13.0 | 12.9 |
| 2.0        | 14.4                                            | 14.3 | 14.3 | 14.2 | 14.1 | 14.0 | 13.9 | 13.8 | 13.7 | 13.6 | 13.5 | 13.4 | 13.3 | 13.3 | 13.2 | 13.1 | 13.0 | 12.9 | 12.8 | 12.7 |
| 2.5        | 14.2                                            | 14.2 | 14.1 | 14.0 | 13.9 | 13.8 | 13.7 | 13.6 | 13.5 | 13.4 | 13.3 | 13.3 | 13.2 | 13.1 | 13.0 | 12.9 | 12.8 | 12.7 | 12.6 | 12.5 |
| 3.0        | 14.1                                            | 14.0 | 13.9 | 13.8 | 13.7 | 13.6 | 13.5 | 13.4 | 13.3 | 13.3 | 13.2 | 13.1 | 13.0 | 12.9 | 12.8 | 12.7 | 12.6 | 12.5 | 12.5 | 12.4 |
| 3.5        | 13.9                                            | 13.8 | 13.7 | 13.6 | 13.5 | 13.4 | 13.3 | 13.3 | 13.2 | 13.1 | 13.0 | 12.9 | 12.8 | 12.7 | 12.6 | 12.6 | 12.5 | 12.4 | 12.3 | 12.2 |
| 4.0        | 13.7                                            | 13.6 | 13.5 | 13.4 | 13.3 | 13.3 | 13.2 | 13.1 | 13.0 | 12.9 | 12.8 | 12.7 | 12.6 | 12.6 | 12.5 | 12.4 | 12.3 | 12.2 | 12.1 | 12.0 |
| 4.5        | 13.5                                            | 13.4 | 13.3 | 13.3 | 13.2 | 13.1 | 13.0 | 12.9 | 12.8 | 12.7 | 12.7 | 12.6 | 12.5 | 12.4 | 12.3 | 12.2 | 12.1 | 12.1 | 12.0 | 11.9 |
| 5.0        | 13.3                                            | 13.3 | 13.2 | 13.1 | 13.0 | 12.9 | 12.8 | 12.7 | 12.7 | 12.6 | 12.5 | 12.4 | 12.3 | 12.2 | 12.2 | 12.1 | 12.0 | 11.9 | 11.8 | 11.7 |
| 5.5        | 13.2                                            | 13.1 | 13.0 | 12.9 | 12.8 | 12.7 | 12.7 | 12.6 | 12.5 | 12.4 | 12.3 | 12.2 | 12.2 | 12.1 | 12.0 | 11.9 | 11.8 | 11.7 | 11.7 | 11.6 |
| 6.0        | 13.0                                            | 12.9 | 12.8 | 12.8 | 12.7 | 12.6 | 12.5 | 12.4 | 12.3 | 12.3 | 12.2 | 12.1 | 12.0 | 11.9 | 11.8 | 11.8 | 11.7 | 11.6 | 11.5 | 11.4 |
| 6.5        | 12.8                                            | 12.8 | 12.7 | 12.6 | 12.5 | 12.4 | 12.3 | 12.3 | 12.2 | 12.1 | 12.0 | 11.9 | 11.9 | 11.8 | 11.7 | 11.6 | 11.5 | 11.5 | 11.4 | 11.3 |
| 7.0        | 12.7                                            | 12.6 | 12.5 | 12.4 | 12.4 | 12.3 | 12.2 | 12.1 | 12.0 | 12.0 | 11.9 | 11.8 | 11.7 | 11.6 | 11.6 | 11.5 | 11.4 | 11.3 | 11.2 | 11.1 |
| 7.5        | 12.5                                            | 12.4 | 12.4 | 12.3 | 12.2 | 12.1 | 12.0 | 12.0 | 11.9 | 11.8 | 11.7 | 11.6 | 11.6 | 11.5 | 11.4 | 11.3 | 11.3 | 11.2 | 11.1 | 11.0 |
| 8.0        | 12.4                                            | 12.3 | 12.2 | 12.1 | 12.1 | 12.0 | 11.9 | 11.8 | 11.7 | 11.7 | 11.6 | 11.5 | 11.4 | 11.3 | 11.3 | 11.2 | 11.1 | 11.0 | 11.0 | 10.9 |
| 8.5        | 12.2                                            | 12.1 | 12.1 | 12.0 | 11.9 | 11.8 | 11.8 | 11.7 | 11.6 | 11.5 | 11.4 | 11.4 | 11.3 | 11.2 | 11.1 | 11.1 | 11.0 | 10.9 | 10.8 | 10.7 |
| 9.0        | 12.1                                            | 12.0 | 11.9 | 11.8 | 11.8 | 11.7 | 11.6 | 11.5 | 11.5 | 11.4 | 11.3 | 11.2 | 11.2 | 11.1 | 11.0 | 10.9 | 10.8 | 10.8 | 10.7 | 10.6 |
| 9.5        | 11.9                                            | 11.9 | 11.8 | 11.7 | 11.6 | 11.6 | 11.5 | 11.4 | 11.3 | 11.2 | 11.2 | 11.1 | 11.0 | 10.9 | 10.9 | 10.8 | 10.7 | 10.6 | 10.6 | 10.5 |
| 10.0       | 11.8                                            | 11.7 | 11.6 | 11.6 | 11.5 | 11.4 | 11.3 | 11.3 | 11.2 | 11.1 | 11.0 | 11.0 | 10.9 | 10.8 | 10.7 | 10.7 | 10.6 | 10.5 | 10.4 | 10.4 |
| 10.5       | 11.7                                            | 11.6 | 11.5 | 11.4 | 11.4 | 11.3 | 11.2 | 11.1 | 11.1 | 11.0 | 10.9 | 10.8 | 10.8 | 10.7 | 10.6 | 10.5 | 10.5 | 10.4 | 10.3 | 10.2 |
| 11.0       | 11.5                                            | 11.4 | 11.4 | 11.3 | 11.2 | 11.2 | 11.1 | 11.0 | 10.9 | 10.9 | 10.8 | 10.7 | 10.6 | 10.6 | 10.5 | 10.4 | 10.3 | 10.3 | 10.2 | 10.1 |
| 11.5       | 11.4                                            | 11.3 | 11.2 | 11.2 | 11.1 | 11.0 | 11.0 | 10.9 | 10.8 | 10.7 | 10.7 | 10.6 | 10.5 | 10.4 | 10.4 | 10.3 | 10.2 | 10.2 | 10.1 | 10.0 |
| 12.0       | 11.3                                            | 11.2 | 11.1 | 11.0 | 11.0 | 10.9 | 10.8 | 10.8 | 10.7 | 10.6 | 10.5 | 10.5 | 10.4 | 10.3 | 10.3 | 10.2 | 10.1 | 10.0 | 10.0 | 9.9  |
| 12.5       | 11.1                                            | 11.1 | 11.0 | 10.9 | 10.8 | 10.8 | 10.7 | 10.6 | 10.6 | 10.5 | 10.4 | 10.4 | 10.3 | 10.2 | 10.1 | 10.1 | 10.0 | 9.9  | 9.9  | 9.8  |
| 13.0       | 11.0                                            | 10.9 | 10.9 | 10.8 | 10.7 | 10.7 | 10.6 | 10.5 | 10.4 | 10.4 | 10.3 | 10.2 | 10.2 | 10.1 | 10.0 | 10.0 | 9.9  | 9.8  | 9.7  | 9.7  |
| 13.5       | 10.9                                            | 10.8 | 10.7 | 10.7 | 10.6 | 10.5 | 10.5 | 10.4 | 10.3 | 10.3 | 10.2 | 10.1 | 10.1 | 10.0 | 9.9  | 9.8  | 9.8  | 9.7  | 9.6  | 9.6  |
| 14.0       | 10.8                                            | 10.7 | 10.6 | 10.6 | 10.5 | 10.4 | 10.4 | 10.3 | 10.2 | 10.1 | 10.1 | 10.0 | 9.9  | 9.9  | 9.8  | 9.7  | 9.7  | 9.6  | 9.5  | 9.5  |
| 14.5       | 10.6                                            | 10.6 | 10.5 | 10.4 | 10.4 | 10.3 | 10.2 | 10.2 | 10.1 | 10.0 | 10.0 | 9.9  | 9.8  | 9.8  | 9.7  | 9.6  | 9.6  | 9.5  | 9.4  | 9.4  |

## Solubility of oxygen in water at various temperatures and pressures - Continued

| Temp<br>°C | Atmospheric pressure, in millimeters of mercury |      |      |      |      |      |      |      |      |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|------------|-------------------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|            | 795                                             | 790  | 785  | 780  | 775  | 770  | 765  | 760  | 755  | 750 | 745 | 740 | 735 | 730 | 725 | 720 | 715 | 710 | 705 | 700 |
| 15.0       | 10.5                                            | 10.5 | 10.4 | 10.3 | 10.3 | 10.2 | 10.1 | 10.1 | 10.0 | 9.9 | 9.9 | 9.8 | 9.7 | 9.7 | 9.6 | 9.5 | 9.5 | 9.4 | 9.3 | 9.3 |
| 15.5       | 10.4                                            | 10.4 | 10.3 | 10.2 | 10.2 | 10.1 | 10.0 | 10.0 | 9.9  | 9.8 | 9.8 | 9.7 | 9.6 | 9.6 | 9.5 | 9.4 | 9.4 | 9.3 | 9.2 | 9.2 |
| 16.0       | 10.3                                            | 10.2 | 10.2 | 10.1 | 10.0 | 10.0 | 9.9  | 9.8  | 9.8  | 9.7 | 9.7 | 9.6 | 9.5 | 9.5 | 9.4 | 9.3 | 9.3 | 9.2 | 9.1 | 9.1 |
| 16.5       | 10.2                                            | 10.1 | 10.1 | 10.0 | 9.9  | 9.9  | 9.8  | 9.7  | 9.7  | 9.6 | 9.5 | 9.5 | 9.4 | 9.4 | 9.3 | 9.2 | 9.2 | 9.1 | 9.0 | 9.0 |
| 17.0       | 10.1                                            | 10.0 | 10.0 | 9.9  | 9.8  | 9.8  | 9.7  | 9.6  | 9.6  | 9.5 | 9.4 | 9.4 | 9.3 | 9.3 | 9.2 | 9.1 | 9.1 | 9.0 | 8.9 | 8.9 |
| 17.5       | 10.0                                            | 9.9  | 9.9  | 9.8  | 9.7  | 9.7  | 9.6  | 9.5  | 9.5  | 9.4 | 9.3 | 9.3 | 9.2 | 9.2 | 9.1 | 9.0 | 9.0 | 8.9 | 8.8 | 8.8 |
| 18.0       | 9.9                                             | 9.8  | 9.8  | 9.7  | 9.6  | 9.6  | 9.5  | 9.4  | 9.4  | 9.3 | 9.3 | 9.2 | 9.1 | 9.1 | 9.0 | 8.9 | 8.9 | 8.8 | 8.7 | 8.7 |
| 18.5       | 9.8                                             | 9.7  | 9.7  | 9.6  | 9.5  | 9.5  | 9.4  | 9.3  | 9.3  | 9.2 | 9.2 | 9.1 | 9.0 | 9.0 | 8.9 | 8.8 | 8.8 | 8.7 | 8.7 | 8.6 |
| 19.0       | 9.7                                             | 9.6  | 9.6  | 9.5  | 9.4  | 9.4  | 9.3  | 9.3  | 9.2  | 9.1 | 9.1 | 9.0 | 8.9 | 8.9 | 8.8 | 8.8 | 8.7 | 8.6 | 8.6 | 8.5 |
| 19.5       | 9.6                                             | 9.5  | 9.5  | 9.4  | 9.3  | 9.3  | 9.2  | 9.2  | 9.1  | 9.0 | 9.0 | 8.9 | 8.9 | 8.8 | 8.7 | 8.7 | 8.6 | 8.5 | 8.5 | 8.4 |
| 20.0       | 9.5                                             | 9.4  | 9.4  | 9.3  | 9.3  | 9.2  | 9.1  | 9.1  | 9.0  | 8.9 | 8.9 | 8.8 | 8.8 | 8.7 | 8.6 | 8.6 | 8.5 | 8.5 | 8.4 | 8.3 |
| 20.5       | 9.4                                             | 9.3  | 9.3  | 9.2  | 9.2  | 9.1  | 9.0  | 9.0  | 8.9  | 8.9 | 8.8 | 8.7 | 8.7 | 8.6 | 8.6 | 8.5 | 8.4 | 8.4 | 8.3 | 8.3 |
| 21.0       | 9.3                                             | 9.2  | 9.2  | 9.1  | 9.1  | 9.0  | 8.9  | 8.9  | 8.8  | 8.8 | 8.7 | 8.6 | 8.6 | 8.5 | 8.5 | 8.4 | 8.4 | 8.3 | 8.2 | 8.2 |
| 21.5       | 9.2                                             | 9.2  | 9.1  | 9.0  | 9.0  | 8.9  | 8.9  | 8.8  | 8.7  | 8.7 | 8.6 | 8.6 | 8.5 | 8.4 | 8.4 | 8.3 | 8.3 | 8.2 | 8.1 | 8.1 |
| 22.0       | 9.1                                             | 9.1  | 9.0  | 9.0  | 8.9  | 8.8  | 8.8  | 8.7  | 8.7  | 8.6 | 8.5 | 8.5 | 8.4 | 8.4 | 8.3 | 8.2 | 8.2 | 8.1 | 8.1 | 8.0 |
| 22.5       | 9.0                                             | 9.0  | 8.9  | 8.9  | 8.8  | 8.8  | 8.7  | 8.6  | 8.6  | 8.5 | 8.5 | 8.4 | 8.3 | 8.3 | 8.2 | 8.2 | 8.1 | 8.0 | 8.0 | 7.9 |
| 23.0       | 9.0                                             | 8.9  | 8.8  | 8.8  | 8.7  | 8.7  | 8.6  | 8.6  | 8.5  | 8.4 | 8.4 | 8.3 | 8.3 | 8.2 | 8.1 | 8.1 | 8.0 | 8.0 | 7.9 | 7.9 |
| 23.5       | 8.9                                             | 8.8  | 8.8  | 8.7  | 8.6  | 8.6  | 8.5  | 8.5  | 8.4  | 8.4 | 8.3 | 8.2 | 8.2 | 8.1 | 8.1 | 8.0 | 8.0 | 7.9 | 7.8 | 7.8 |
| 24.0       | 8.8                                             | 8.7  | 8.7  | 8.6  | 8.6  | 8.5  | 8.4  | 8.4  | 8.3  | 8.3 | 8.2 | 8.2 | 8.1 | 8.0 | 8.0 | 7.9 | 7.9 | 7.8 | 7.8 | 7.7 |
| 24.5       | 8.7                                             | 8.7  | 8.6  | 8.5  | 8.5  | 8.4  | 8.4  | 8.3  | 8.3  | 8.2 | 8.1 | 8.1 | 8.0 | 8.0 | 7.9 | 7.9 | 7.8 | 7.7 | 7.7 | 7.6 |
| 25.0       | 8.6                                             | 8.6  | 8.5  | 8.5  | 8.4  | 8.3  | 8.3  | 8.2  | 8.2  | 8.1 | 8.1 | 8.0 | 8.0 | 7.9 | 7.8 | 7.8 | 7.7 | 7.7 | 7.6 | 7.6 |
| 25.5       | 8.5                                             | 8.5  | 8.4  | 8.4  | 8.3  | 8.3  | 8.2  | 8.2  | 8.1  | 8.0 | 8.0 | 7.9 | 7.9 | 7.8 | 7.8 | 7.7 | 7.7 | 7.6 | 7.6 | 7.5 |
| 26.0       | 8.5                                             | 8.4  | 8.4  | 8.3  | 8.3  | 8.2  | 8.1  | 8.1  | 8.0  | 8.0 | 7.9 | 7.9 | 7.8 | 7.8 | 7.7 | 7.6 | 7.6 | 7.5 | 7.5 | 7.4 |
| 26.5       | 8.4                                             | 8.3  | 8.3  | 8.2  | 8.2  | 8.1  | 8.1  | 8.0  | 8.0  | 7.9 | 7.8 | 7.8 | 7.7 | 7.7 | 7.6 | 7.6 | 7.5 | 7.5 | 7.4 | 7.4 |
| 27.0       | 8.3                                             | 8.3  | 8.2  | 8.2  | 8.1  | 8.0  | 8.0  | 7.9  | 7.9  | 7.8 | 7.8 | 7.7 | 7.7 | 7.6 | 7.6 | 7.5 | 7.5 | 7.4 | 7.3 | 7.3 |
| 27.5       | 8.2                                             | 8.2  | 8.1  | 8.1  | 8.0  | 8.0  | 7.9  | 7.9  | 7.8  | 7.8 | 7.7 | 7.7 | 7.6 | 7.5 | 7.5 | 7.4 | 7.4 | 7.3 | 7.3 | 7.2 |
| 28.0       | 8.2                                             | 8.1  | 8.1  | 8.0  | 8.0  | 7.9  | 7.9  | 7.8  | 7.7  | 7.7 | 7.6 | 7.6 | 7.5 | 7.5 | 7.4 | 7.4 | 7.3 | 7.3 | 7.2 | 7.2 |
| 28.5       | 8.1                                             | 8.0  | 8.0  | 7.9  | 7.9  | 7.8  | 7.8  | 7.7  | 7.7  | 7.6 | 7.6 | 7.5 | 7.5 | 7.4 | 7.4 | 7.3 | 7.3 | 7.2 | 7.1 | 7.1 |
| 29.0       | 8.0                                             | 8.0  | 7.9  | 7.9  | 7.8  | 7.8  | 7.7  | 7.7  | 7.6  | 7.6 | 7.5 | 7.5 | 7.4 | 7.3 | 7.3 | 7.2 | 7.2 | 7.1 | 7.1 | 7.0 |
| 29.5       | 8.0                                             | 7.9  | 7.9  | 7.8  | 7.8  | 7.7  | 7.6  | 7.6  | 7.5  | 7.5 | 7.4 | 7.4 | 7.3 | 7.3 | 7.2 | 7.2 | 7.1 | 7.1 | 7.0 | 7.0 |

## Solubility of oxygen in water at various temperatures and pressures - Continued

| Temp<br>°C | Atmospheric pressure, in millimeters of mercury |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|------------|-------------------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|            | 795                                             | 790 | 785 | 780 | 775 | 770 | 765 | 760 | 755 | 750 | 745 | 740 | 735 | 730 | 725 | 720 | 715 | 710 | 705 | 700 |
| 30.0       | 7.9                                             | 7.8 | 7.8 | 7.7 | 7.7 | 7.6 | 7.6 | 7.5 | 7.5 | 7.4 | 7.4 | 7.3 | 7.3 | 7.2 | 7.2 | 7.1 | 7.1 | 7.0 | 7.0 | 6.9 |
| 30.5       | 7.8                                             | 7.8 | 7.7 | 7.7 | 7.6 | 7.6 | 7.5 | 7.5 | 7.4 | 7.4 | 7.3 | 7.3 | 7.2 | 7.2 | 7.1 | 7.1 | 7.0 | 7.0 | 6.9 | 6.9 |
| 31.0       | 7.8                                             | 7.7 | 7.7 | 7.6 | 7.6 | 7.5 | 7.5 | 7.4 | 7.4 | 7.3 | 7.3 | 7.2 | 7.1 | 7.1 | 7.0 | 7.0 | 6.9 | 6.9 | 6.8 | 6.8 |
| 31.5       | 7.7                                             | 7.6 | 7.6 | 7.5 | 7.5 | 7.4 | 7.4 | 7.3 | 7.3 | 7.2 | 7.2 | 7.1 | 7.1 | 7.0 | 7.0 | 6.9 | 6.9 | 6.8 | 6.8 | 6.7 |
| 32.0       | 7.6                                             | 7.6 | 7.5 | 7.5 | 7.4 | 7.4 | 7.3 | 7.3 | 7.2 | 7.2 | 7.1 | 7.1 | 7.0 | 7.0 | 6.9 | 6.9 | 6.8 | 6.8 | 6.7 | 6.7 |
| 32.5       | 7.6                                             | 7.5 | 7.5 | 7.4 | 7.4 | 7.3 | 7.3 | 7.2 | 7.2 | 7.1 | 7.1 | 7.0 | 7.0 | 6.9 | 6.9 | 6.8 | 6.8 | 6.7 | 6.7 | 6.6 |
| 33.0       | 7.5                                             | 7.5 | 7.4 | 7.4 | 7.3 | 7.3 | 7.2 | 7.2 | 7.1 | 7.1 | 7.0 | 7.0 | 6.9 | 6.9 | 6.8 | 6.8 | 6.7 | 6.7 | 6.6 | 6.6 |
| 33.5       | 7.4                                             | 7.4 | 7.3 | 7.3 | 7.2 | 7.2 | 7.1 | 7.1 | 7.1 | 7.0 | 7.0 | 6.9 | 6.9 | 6.8 | 6.8 | 6.7 | 6.7 | 6.6 | 6.6 | 6.5 |
| 34.0       | 7.4                                             | 7.3 | 7.3 | 7.2 | 7.2 | 7.1 | 7.1 | 7.0 | 7.0 | 6.9 | 6.9 | 6.8 | 6.8 | 6.7 | 6.7 | 6.7 | 6.6 | 6.6 | 6.5 | 6.5 |
| 34.5       | 7.3                                             | 7.3 | 7.2 | 7.2 | 7.1 | 7.1 | 7.0 | 7.0 | 6.9 | 6.9 | 6.8 | 6.8 | 6.7 | 6.7 | 6.6 | 6.6 | 6.5 | 6.5 | 6.5 | 6.4 |
| 35.0       | 7.3                                             | 7.2 | 7.2 | 7.1 | 7.1 | 7.0 | 7.0 | 6.9 | 6.9 | 6.8 | 6.8 | 6.7 | 6.7 | 6.6 | 6.6 | 6.5 | 6.5 | 6.4 | 6.4 | 6.3 |
| 35.5       | 7.2                                             | 7.2 | 7.1 | 7.1 | 7.0 | 7.0 | 6.9 | 6.9 | 6.8 | 6.8 | 6.7 | 6.7 | 6.6 | 6.6 | 6.5 | 6.5 | 6.4 | 6.4 | 6.3 | 6.3 |
| 36.0       | 7.2                                             | 7.1 | 7.1 | 7.0 | 7.0 | 6.9 | 6.9 | 6.8 | 6.8 | 6.7 | 6.7 | 6.6 | 6.6 | 6.5 | 6.5 | 6.4 | 6.4 | 6.3 | 6.3 | 6.2 |
| 36.5       | 7.1                                             | 7.0 | 7.0 | 7.0 | 6.9 | 6.9 | 6.8 | 6.8 | 6.7 | 6.7 | 6.6 | 6.6 | 6.5 | 6.5 | 6.4 | 6.4 | 6.3 | 6.3 | 6.2 | 6.2 |
| 37.0       | 7.0                                             | 7.0 | 6.9 | 6.9 | 6.9 | 6.8 | 6.8 | 6.7 | 6.7 | 6.6 | 6.6 | 6.5 | 6.5 | 6.4 | 6.4 | 6.3 | 6.3 | 6.2 | 6.2 | 6.1 |
| 37.5       | 7.0                                             | 6.9 | 6.9 | 6.8 | 6.8 | 6.8 | 6.7 | 6.7 | 6.6 | 6.6 | 6.5 | 6.5 | 6.4 | 6.4 | 6.3 | 6.3 | 6.2 | 6.2 | 6.1 | 6.1 |
| 38.0       | 6.9                                             | 6.9 | 6.8 | 6.8 | 6.7 | 6.7 | 6.7 | 6.6 | 6.6 | 6.5 | 6.5 | 6.4 | 6.4 | 6.3 | 6.3 | 6.2 | 6.2 | 6.1 | 6.1 | 6.0 |
| 38.5       | 6.9                                             | 6.8 | 6.8 | 6.7 | 6.7 | 6.6 | 6.6 | 6.6 | 6.5 | 6.5 | 6.4 | 6.4 | 6.3 | 6.3 | 6.2 | 6.2 | 6.1 | 6.1 | 6.0 | 6.0 |
| 39.0       | 6.8                                             | 6.8 | 6.7 | 6.7 | 6.6 | 6.6 | 6.5 | 6.5 | 6.5 | 6.4 | 6.4 | 6.3 | 6.3 | 6.2 | 6.2 | 6.1 | 6.1 | 6.0 | 6.0 | 6.0 |
| 39.5       | 6.8                                             | 6.7 | 6.7 | 6.6 | 6.6 | 6.5 | 6.5 | 6.5 | 6.4 | 6.4 | 6.3 | 6.3 | 6.2 | 6.2 | 6.1 | 6.1 | 6.0 | 6.0 | 6.0 | 5.9 |
| 40.0       | 6.7                                             | 6.7 | 6.6 | 6.6 | 6.5 | 6.5 | 6.4 | 6.4 | 6.4 | 6.3 | 6.3 | 6.2 | 6.2 | 6.1 | 6.1 | 6.0 | 6.0 | 5.9 | 5.9 | 5.9 |

## Solubility of oxygen in water at various temperatures and pressures - Continued

| Temp<br>°C | Atmospheric pressure, in millimeters of mercury |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|------------|-------------------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|            | 695                                             | 690  | 685  | 680  | 675  | 670  | 665  | 660  | 655  | 650  | 645  | 640  | 635  | 630  | 625  | 620  | 615  | 610  | 605  | 600  |
| 0.0        | 13.3                                            | 13.2 | 13.1 | 13.0 | 12.9 | 12.8 | 12.8 | 12.7 | 12.6 | 12.5 | 12.4 | 12.3 | 12.2 | 12.1 | 12.0 | 11.9 | 11.8 | 11.7 | 11.6 | 11.5 |
| 0.5        | 13.1                                            | 13.1 | 13.0 | 12.9 | 12.8 | 12.7 | 12.6 | 12.5 | 12.4 | 12.3 | 12.2 | 12.1 | 12.0 | 11.9 | 11.8 | 11.7 | 11.6 | 11.5 | 11.4 | 11.3 |
| 1.0        | 13.0                                            | 12.9 | 12.8 | 12.7 | 12.6 | 12.5 | 12.4 | 12.3 | 12.2 | 12.1 | 12.0 | 11.9 | 11.8 | 11.7 | 11.6 | 11.6 | 11.5 | 11.4 | 11.3 | 11.2 |
| 1.5        | 12.8                                            | 12.7 | 12.6 | 12.5 | 12.4 | 12.3 | 12.2 | 12.1 | 12.0 | 12.0 | 11.9 | 11.8 | 11.7 | 11.6 | 11.5 | 11.4 | 11.3 | 11.2 | 11.1 | 11.0 |
| 2.0        | 12.6                                            | 12.5 | 12.4 | 12.3 | 12.2 | 12.2 | 12.1 | 12.0 | 11.9 | 11.8 | 11.7 | 11.6 | 11.5 | 11.4 | 11.3 | 11.2 | 11.1 | 11.1 | 11.0 | 10.9 |
| 2.5        | 12.4                                            | 12.4 | 12.3 | 12.2 | 12.1 | 12.0 | 11.9 | 11.8 | 11.7 | 11.6 | 11.5 | 11.4 | 11.4 | 11.3 | 11.2 | 11.1 | 11.0 | 10.9 | 10.8 | 10.7 |
| 3.0        | 12.3                                            | 12.2 | 12.1 | 12.0 | 11.9 | 11.8 | 11.7 | 11.7 | 11.6 | 11.5 | 11.4 | 11.3 | 11.2 | 11.1 | 11.0 | 10.9 | 10.9 | 10.8 | 10.7 | 10.6 |
| 3.5        | 12.1                                            | 12.0 | 11.9 | 11.8 | 11.8 | 11.7 | 11.6 | 11.5 | 11.4 | 11.3 | 11.2 | 11.1 | 11.1 | 11.0 | 10.9 | 10.8 | 10.7 | 10.6 | 10.5 | 10.4 |
| 4.0        | 12.0                                            | 11.9 | 11.8 | 11.7 | 11.6 | 11.5 | 11.4 | 11.3 | 11.3 | 11.2 | 11.1 | 11.0 | 10.9 | 10.8 | 10.7 | 10.7 | 10.6 | 10.5 | 10.4 | 10.3 |
| 4.5        | 11.8                                            | 11.7 | 11.6 | 11.5 | 11.5 | 11.4 | 11.3 | 11.2 | 11.1 | 11.0 | 10.9 | 10.9 | 10.8 | 10.7 | 10.6 | 10.5 | 10.4 | 10.3 | 10.3 | 10.2 |
| 5.0        | 11.6                                            | 11.6 | 11.5 | 11.4 | 11.3 | 11.2 | 11.1 | 11.1 | 11.0 | 10.9 | 10.8 | 10.7 | 10.6 | 10.5 | 10.5 | 10.4 | 10.3 | 10.2 | 10.1 | 10.0 |
| 5.5        | 11.5                                            | 11.4 | 11.3 | 11.2 | 11.2 | 11.1 | 11.0 | 10.9 | 10.8 | 10.7 | 10.7 | 10.6 | 10.5 | 10.4 | 10.3 | 10.2 | 10.2 | 10.1 | 10.0 | 9.9  |
| 6.0        | 11.4                                            | 11.3 | 11.2 | 11.1 | 11.0 | 10.9 | 10.9 | 10.8 | 10.7 | 10.6 | 10.5 | 10.4 | 10.4 | 10.3 | 10.2 | 10.1 | 10.0 | 9.9  | 9.9  | 9.8  |
| 6.5        | 11.2                                            | 11.1 | 11.0 | 11.0 | 10.9 | 10.8 | 10.7 | 10.6 | 10.6 | 10.5 | 10.4 | 10.3 | 10.2 | 10.1 | 10.1 | 10.0 | 9.9  | 9.8  | 9.7  | 9.7  |
| 7.0        | 11.1                                            | 11.0 | 10.9 | 10.8 | 10.7 | 10.7 | 10.6 | 10.5 | 10.4 | 10.3 | 10.3 | 10.2 | 10.1 | 10.0 | 9.9  | 9.9  | 9.8  | 9.7  | 9.6  | 9.5  |
| 7.5        | 10.9                                            | 10.9 | 10.8 | 10.7 | 10.6 | 10.5 | 10.5 | 10.4 | 10.3 | 10.2 | 10.1 | 10.1 | 10.0 | 9.9  | 9.8  | 9.7  | 9.7  | 9.6  | 9.5  | 9.4  |
| 8.0        | 10.8                                            | 10.7 | 10.6 | 10.6 | 10.5 | 10.4 | 10.3 | 10.2 | 10.2 | 10.1 | 10.0 | 9.9  | 9.9  | 9.8  | 9.7  | 9.6  | 9.5  | 9.5  | 9.4  | 9.3  |
| 8.5        | 10.7                                            | 10.6 | 10.5 | 10.4 | 10.4 | 10.3 | 10.2 | 10.1 | 10.0 | 10.0 | 9.9  | 9.8  | 9.7  | 9.7  | 9.6  | 9.5  | 9.4  | 9.3  | 9.3  | 9.2  |
| 9.0        | 10.5                                            | 10.5 | 10.4 | 10.3 | 10.2 | 10.2 | 10.1 | 10.0 | 9.9  | 9.8  | 9.8  | 9.7  | 9.6  | 9.5  | 9.5  | 9.4  | 9.3  | 9.2  | 9.2  | 9.1  |
| 9.5        | 10.4                                            | 10.3 | 10.3 | 10.2 | 10.1 | 10.0 | 10.0 | 9.9  | 9.8  | 9.7  | 9.7  | 9.6  | 9.5  | 9.4  | 9.4  | 9.3  | 9.2  | 9.1  | 9.0  | 9.0  |
| 10.0       | 10.3                                            | 10.2 | 10.1 | 10.1 | 10.0 | 9.9  | 9.8  | 9.8  | 9.7  | 9.6  | 9.5  | 9.5  | 9.4  | 9.3  | 9.2  | 9.2  | 9.1  | 9.0  | 8.9  | 8.9  |
| 10.5       | 10.2                                            | 10.1 | 10.0 | 9.9  | 9.9  | 9.8  | 9.7  | 9.7  | 9.6  | 9.5  | 9.4  | 9.4  | 9.3  | 9.2  | 9.1  | 9.1  | 9.0  | 8.9  | 8.8  | 8.8  |
| 11.0       | 10.1                                            | 10.0 | 9.9  | 9.8  | 9.8  | 9.7  | 9.6  | 9.5  | 9.5  | 9.4  | 9.3  | 9.2  | 9.2  | 9.1  | 9.0  | 9.0  | 8.9  | 8.8  | 8.7  | 8.7  |
| 11.5       | 9.9                                             | 9.9  | 9.8  | 9.7  | 9.6  | 9.6  | 9.5  | 9.4  | 9.4  | 9.3  | 9.2  | 9.1  | 9.1  | 9.0  | 8.9  | 8.8  | 8.8  | 8.7  | 8.6  | 8.6  |
| 12.0       | 9.8                                             | 9.8  | 9.7  | 9.6  | 9.5  | 9.5  | 9.4  | 9.3  | 9.2  | 9.2  | 9.1  | 9.0  | 9.0  | 8.9  | 8.8  | 8.7  | 8.7  | 8.6  | 8.5  | 8.5  |
| 12.5       | 9.7                                             | 9.6  | 9.6  | 9.5  | 9.4  | 9.4  | 9.3  | 9.2  | 9.1  | 9.1  | 9.0  | 8.9  | 8.9  | 8.8  | 8.7  | 8.6  | 8.6  | 8.5  | 8.4  | 8.4  |
| 13.0       | 9.6                                             | 9.5  | 9.5  | 9.4  | 9.3  | 9.3  | 9.2  | 9.1  | 9.0  | 9.0  | 8.9  | 8.8  | 8.8  | 8.7  | 8.6  | 8.5  | 8.5  | 8.4  | 8.3  | 8.3  |
| 13.5       | 9.5                                             | 9.4  | 9.4  | 9.3  | 9.2  | 9.1  | 9.1  | 9.0  | 8.9  | 8.9  | 8.8  | 8.7  | 8.7  | 8.6  | 8.5  | 8.5  | 8.4  | 8.3  | 8.2  | 8.2  |
| 14.0       | 9.4                                             | 9.3  | 9.3  | 9.2  | 9.1  | 9.0  | 9.0  | 8.9  | 8.8  | 8.8  | 8.7  | 8.6  | 8.6  | 8.5  | 8.4  | 8.4  | 8.3  | 8.2  | 8.2  | 8.1  |
| 14.5       | 9.3                                             | 9.2  | 9.2  | 9.1  | 9.0  | 8.9  | 8.9  | 8.8  | 8.7  | 8.7  | 8.6  | 8.5  | 8.5  | 8.4  | 8.3  | 8.3  | 8.2  | 8.1  | 8.1  | 8.0  |

## Solubility of oxygen in water at various temperatures and pressures - Continued

| Temp<br>°C | Atmospheric pressure, in millimeters of mercury |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|------------|-------------------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|            | 695                                             | 690 | 685 | 680 | 675 | 670 | 665 | 660 | 655 | 650 | 645 | 640 | 635 | 630 | 625 | 620 | 615 | 610 | 605 | 600 |
| 15.0       | 9.2                                             | 9.1 | 9.1 | 9.0 | 8.9 | 8.8 | 8.8 | 8.7 | 8.6 | 8.6 | 8.5 | 8.4 | 8.4 | 8.3 | 8.2 | 8.2 | 8.1 | 8.0 | 8.0 | 7.9 |
| 15.5       | 9.1                                             | 9.0 | 9.0 | 8.9 | 8.8 | 8.8 | 8.7 | 8.6 | 8.6 | 8.5 | 8.4 | 8.4 | 8.3 | 8.2 | 8.2 | 8.1 | 8.0 | 8.0 | 7.9 | 7.8 |
| 16.0       | 9.0                                             | 8.9 | 8.9 | 8.8 | 8.7 | 8.7 | 8.6 | 8.5 | 8.5 | 8.4 | 8.3 | 8.3 | 8.2 | 8.1 | 8.1 | 8.0 | 7.9 | 7.9 | 7.8 | 7.7 |
| 16.5       | 8.9                                             | 8.8 | 8.8 | 8.7 | 8.6 | 8.6 | 8.5 | 8.4 | 8.4 | 8.3 | 8.2 | 8.2 | 8.1 | 8.0 | 8.0 | 7.9 | 7.8 | 7.8 | 7.7 | 7.7 |
| 17.0       | 8.8                                             | 8.7 | 8.7 | 8.6 | 8.5 | 8.5 | 8.4 | 8.3 | 8.3 | 8.2 | 8.2 | 8.1 | 8.0 | 8.0 | 7.9 | 7.8 | 7.8 | 7.7 | 7.6 | 7.6 |
| 17.5       | 8.7                                             | 8.6 | 8.6 | 8.5 | 8.5 | 8.4 | 8.3 | 8.3 | 8.2 | 8.1 | 8.1 | 8.0 | 7.9 | 7.9 | 7.8 | 7.7 | 7.7 | 7.6 | 7.6 | 7.5 |
| 18.0       | 8.6                                             | 8.6 | 8.5 | 8.4 | 8.4 | 8.3 | 8.2 | 8.2 | 8.1 | 8.0 | 8.0 | 7.9 | 7.9 | 7.8 | 7.7 | 7.7 | 7.6 | 7.5 | 7.5 | 7.4 |
| 18.5       | 8.5                                             | 8.5 | 8.4 | 8.3 | 8.3 | 8.2 | 8.2 | 8.1 | 8.0 | 8.0 | 7.9 | 7.8 | 7.8 | 7.7 | 7.7 | 7.6 | 7.5 | 7.5 | 7.4 | 7.3 |
| 19.0       | 8.4                                             | 8.4 | 8.3 | 8.3 | 8.2 | 8.1 | 8.1 | 8.0 | 7.9 | 7.9 | 7.8 | 7.8 | 7.7 | 7.6 | 7.6 | 7.5 | 7.4 | 7.4 | 7.3 | 7.3 |
| 19.5       | 8.4                                             | 8.3 | 8.2 | 8.2 | 8.1 | 8.0 | 8.0 | 7.9 | 7.9 | 7.8 | 7.7 | 7.7 | 7.6 | 7.6 | 7.5 | 7.4 | 7.4 | 7.3 | 7.2 | 7.2 |
| 20.0       | 8.3                                             | 8.2 | 8.2 | 8.1 | 8.0 | 8.0 | 7.9 | 7.8 | 7.8 | 7.7 | 7.7 | 7.6 | 7.5 | 7.5 | 7.4 | 7.4 | 7.3 | 7.2 | 7.2 | 7.1 |
| 20.5       | 8.2                                             | 8.1 | 8.1 | 8.0 | 7.9 | 7.9 | 7.8 | 7.8 | 7.7 | 7.6 | 7.6 | 7.5 | 7.5 | 7.4 | 7.3 | 7.3 | 7.2 | 7.2 | 7.1 | 7.0 |
| 21.0       | 8.1                                             | 8.1 | 8.0 | 7.9 | 7.9 | 7.8 | 7.8 | 7.7 | 7.6 | 7.6 | 7.5 | 7.5 | 7.4 | 7.3 | 7.3 | 7.2 | 7.2 | 7.1 | 7.0 | 7.0 |
| 21.5       | 8.0                                             | 8.0 | 7.9 | 7.9 | 7.8 | 7.7 | 7.7 | 7.6 | 7.6 | 7.5 | 7.4 | 7.4 | 7.3 | 7.3 | 7.2 | 7.1 | 7.1 | 7.0 | 7.0 | 6.9 |
| 22.0       | 8.0                                             | 7.9 | 7.8 | 7.8 | 7.7 | 7.7 | 7.6 | 7.5 | 7.5 | 7.4 | 7.4 | 7.3 | 7.2 | 7.2 | 7.1 | 7.1 | 7.0 | 7.0 | 6.9 | 6.8 |
| 22.5       | 7.9                                             | 7.8 | 7.8 | 7.7 | 7.6 | 7.6 | 7.5 | 7.5 | 7.4 | 7.3 | 7.3 | 7.2 | 7.2 | 7.1 | 7.1 | 7.0 | 6.9 | 6.9 | 6.8 | 6.8 |
| 23.0       | 7.8                                             | 7.7 | 7.7 | 7.6 | 7.6 | 7.5 | 7.5 | 7.4 | 7.3 | 7.3 | 7.2 | 7.2 | 7.1 | 7.0 | 7.0 | 6.9 | 6.9 | 6.8 | 6.8 | 6.7 |
| 23.5       | 7.7                                             | 7.7 | 7.6 | 7.6 | 7.5 | 7.4 | 7.4 | 7.3 | 7.3 | 7.2 | 7.2 | 7.1 | 7.0 | 7.0 | 6.9 | 6.9 | 6.8 | 6.7 | 6.7 | 6.6 |
| 24.0       | 7.7                                             | 7.6 | 7.5 | 7.5 | 7.4 | 7.4 | 7.3 | 7.3 | 7.2 | 7.1 | 7.1 | 7.0 | 7.0 | 6.9 | 6.9 | 6.8 | 6.7 | 6.7 | 6.6 | 6.6 |
| 24.5       | 7.6                                             | 7.5 | 7.5 | 7.4 | 7.4 | 7.3 | 7.2 | 7.2 | 7.1 | 7.1 | 7.0 | 7.0 | 6.9 | 6.8 | 6.8 | 6.7 | 6.7 | 6.6 | 6.6 | 6.5 |
| 25.0       | 7.5                                             | 7.5 | 7.4 | 7.3 | 7.3 | 7.2 | 7.2 | 7.1 | 7.1 | 7.0 | 6.9 | 6.9 | 6.8 | 6.8 | 6.7 | 6.7 | 6.6 | 6.6 | 6.5 | 6.4 |
| 25.5       | 7.4                                             | 7.4 | 7.3 | 7.3 | 7.2 | 7.2 | 7.1 | 7.1 | 7.0 | 6.9 | 6.9 | 6.8 | 6.8 | 6.7 | 6.7 | 6.6 | 6.6 | 6.5 | 6.4 | 6.4 |
| 26.0       | 7.4                                             | 7.3 | 7.3 | 7.2 | 7.2 | 7.1 | 7.0 | 7.0 | 6.9 | 6.9 | 6.8 | 6.8 | 6.7 | 6.7 | 6.6 | 6.5 | 6.5 | 6.4 | 6.4 | 6.3 |
| 26.5       | 7.3                                             | 7.2 | 7.2 | 7.1 | 7.1 | 7.0 | 7.0 | 6.9 | 6.9 | 6.8 | 6.8 | 6.7 | 6.6 | 6.6 | 6.5 | 6.5 | 6.4 | 6.4 | 6.3 | 6.3 |
| 27.0       | 7.2                                             | 7.2 | 7.1 | 7.1 | 7.0 | 7.0 | 6.9 | 6.9 | 6.8 | 6.7 | 6.7 | 6.6 | 6.6 | 6.5 | 6.5 | 6.4 | 6.4 | 6.3 | 6.3 | 6.2 |
| 27.5       | 7.2                                             | 7.1 | 7.1 | 7.0 | 7.0 | 6.9 | 6.8 | 6.8 | 6.7 | 6.7 | 6.6 | 6.6 | 6.5 | 6.5 | 6.4 | 6.4 | 6.3 | 6.3 | 6.2 | 6.2 |
| 28.0       | 7.1                                             | 7.1 | 7.0 | 6.9 | 6.9 | 6.8 | 6.8 | 6.7 | 6.7 | 6.6 | 6.6 | 6.5 | 6.5 | 6.4 | 6.4 | 6.3 | 6.3 | 6.2 | 6.1 | 6.1 |
| 28.5       | 7.0                                             | 7.0 | 6.9 | 6.9 | 6.8 | 6.8 | 6.7 | 6.7 | 6.6 | 6.6 | 6.5 | 6.5 | 6.4 | 6.4 | 6.3 | 6.2 | 6.2 | 6.1 | 6.1 | 6.0 |
| 29.0       | 7.0                                             | 6.9 | 6.9 | 6.8 | 6.8 | 6.7 | 6.7 | 6.6 | 6.6 | 6.5 | 6.5 | 6.4 | 6.4 | 6.3 | 6.2 | 6.2 | 6.1 | 6.1 | 6.0 | 6.0 |
| 29.5       | 6.9                                             | 6.9 | 6.8 | 6.8 | 6.7 | 6.7 | 6.6 | 6.6 | 6.5 | 6.5 | 6.4 | 6.3 | 6.3 | 6.2 | 6.2 | 6.1 | 6.1 | 6.0 | 6.0 | 5.9 |

## Solubility of oxygen in water at various temperatures and pressures - Continued

| Temp<br>°C | Atmospheric pressure, in millimeters of mercury |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|------------|-------------------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|            | 695                                             | 690 | 685 | 680 | 675 | 670 | 665 | 660 | 655 | 650 | 645 | 640 | 635 | 630 | 625 | 620 | 615 | 610 | 605 | 600 |
| 30.0       | 6.9                                             | 6.8 | 6.8 | 6.7 | 6.7 | 6.6 | 6.5 | 6.5 | 6.4 | 6.4 | 6.3 | 6.3 | 6.2 | 6.2 | 6.1 | 6.1 | 6.0 | 6.0 | 5.9 | 5.9 |
| 30.5       | 6.8                                             | 6.7 | 6.7 | 6.6 | 6.6 | 6.5 | 6.5 | 6.4 | 6.4 | 6.3 | 6.3 | 6.2 | 6.2 | 6.1 | 6.1 | 6.0 | 6.0 | 5.9 | 5.9 | 5.8 |
| 31.0       | 6.7                                             | 6.7 | 6.6 | 6.6 | 6.5 | 6.5 | 6.4 | 6.4 | 6.3 | 6.3 | 6.2 | 6.2 | 6.1 | 6.1 | 6.0 | 6.0 | 5.9 | 5.9 | 5.8 | 5.8 |
| 31.5       | 6.7                                             | 6.6 | 6.6 | 6.5 | 6.5 | 6.4 | 6.4 | 6.3 | 6.3 | 6.2 | 6.2 | 6.1 | 6.1 | 6.0 | 6.0 | 5.9 | 5.9 | 5.8 | 5.8 | 5.7 |
| 32.0       | 6.6                                             | 6.6 | 6.5 | 6.5 | 6.4 | 6.4 | 6.3 | 6.3 | 6.2 | 6.2 | 6.1 | 6.1 | 6.0 | 6.0 | 5.9 | 5.9 | 5.8 | 5.8 | 5.7 | 5.7 |
| 32.5       | 6.6                                             | 6.5 | 6.5 | 6.4 | 6.4 | 6.3 | 6.3 | 6.2 | 6.2 | 6.1 | 6.1 | 6.0 | 6.0 | 5.9 | 5.9 | 5.8 | 5.8 | 5.7 | 5.7 | 5.6 |
| 33.0       | 6.5                                             | 6.5 | 6.4 | 6.4 | 6.3 | 6.3 | 6.2 | 6.2 | 6.1 | 6.1 | 6.0 | 6.0 | 5.9 | 5.9 | 5.8 | 5.8 | 5.7 | 5.7 | 5.6 | 5.6 |
| 33.5       | 6.5                                             | 6.4 | 6.4 | 6.3 | 6.3 | 6.2 | 6.2 | 6.1 | 6.1 | 6.0 | 6.0 | 5.9 | 5.9 | 5.8 | 5.8 | 5.7 | 5.7 | 5.6 | 5.6 | 5.5 |
| 34.0       | 6.4                                             | 6.4 | 6.3 | 6.3 | 6.2 | 6.2 | 6.1 | 6.1 | 6.0 | 6.0 | 5.9 | 5.9 | 5.8 | 5.8 | 5.7 | 5.7 | 5.6 | 5.6 | 5.5 | 5.5 |
| 34.5       | 6.4                                             | 6.3 | 6.3 | 6.2 | 6.2 | 6.1 | 6.1 | 6.0 | 6.0 | 5.9 | 5.9 | 5.8 | 5.8 | 5.7 | 5.7 | 5.6 | 5.6 | 5.5 | 5.5 | 5.4 |
| 35.0       | 6.3                                             | 6.3 | 6.2 | 6.2 | 6.1 | 6.1 | 6.0 | 6.0 | 5.9 | 5.9 | 5.8 | 5.8 | 5.7 | 5.7 | 5.6 | 5.6 | 5.5 | 5.5 | 5.4 | 5.4 |
| 35.5       | 6.2                                             | 6.2 | 6.2 | 6.1 | 6.1 | 6.0 | 6.0 | 5.9 | 5.9 | 5.8 | 5.8 | 5.7 | 5.7 | 5.6 | 5.6 | 5.5 | 5.5 | 5.4 | 5.4 | 5.3 |
| 36.0       | 6.2                                             | 6.1 | 6.1 | 6.1 | 6.0 | 6.0 | 5.9 | 5.9 | 5.8 | 5.8 | 5.7 | 5.7 | 5.6 | 5.6 | 5.5 | 5.5 | 5.4 | 5.4 | 5.3 | 5.3 |
| 36.5       | 6.1                                             | 6.1 | 6.1 | 6.0 | 6.0 | 5.9 | 5.9 | 5.8 | 5.8 | 5.7 | 5.7 | 5.6 | 5.6 | 5.5 | 5.5 | 5.4 | 5.4 | 5.3 | 5.3 | 5.2 |
| 37.0       | 6.1                                             | 6.1 | 6.0 | 6.0 | 5.9 | 5.9 | 5.8 | 5.8 | 5.7 | 5.7 | 5.6 | 5.6 | 5.5 | 5.5 | 5.4 | 5.4 | 5.3 | 5.3 | 5.3 | 5.2 |
| 37.5       | 6.0                                             | 6.0 | 6.0 | 5.9 | 5.9 | 5.8 | 5.8 | 5.7 | 5.7 | 5.6 | 5.6 | 5.5 | 5.5 | 5.4 | 5.4 | 5.3 | 5.3 | 5.3 | 5.2 | 5.2 |
| 38.0       | 6.0                                             | 6.0 | 5.9 | 5.9 | 5.8 | 5.8 | 5.7 | 5.7 | 5.6 | 5.6 | 5.5 | 5.5 | 5.4 | 5.4 | 5.3 | 5.3 | 5.3 | 5.2 | 5.2 | 5.1 |
| 38.5       | 6.0                                             | 5.9 | 5.9 | 5.8 | 5.8 | 5.7 | 5.7 | 5.6 | 5.6 | 5.5 | 5.5 | 5.4 | 5.4 | 5.4 | 5.3 | 5.3 | 5.2 | 5.2 | 5.1 | 5.1 |
| 39.0       | 5.9                                             | 5.9 | 5.8 | 5.8 | 5.7 | 5.7 | 5.6 | 5.6 | 5.5 | 5.5 | 5.4 | 5.4 | 5.4 | 5.3 | 5.3 | 5.2 | 5.2 | 5.1 | 5.1 | 5.0 |
| 39.5       | 5.9                                             | 5.8 | 5.8 | 5.7 | 5.7 | 5.6 | 5.6 | 5.5 | 5.5 | 5.4 | 5.4 | 5.4 | 5.3 | 5.3 | 5.2 | 5.2 | 5.1 | 5.1 | 5.0 | 5.0 |
| 40.0       | 5.8                                             | 5.8 | 5.7 | 5.7 | 5.6 | 5.6 | 5.5 | 5.5 | 5.4 | 5.4 | 5.4 | 5.3 | 5.3 | 5.2 | 5.2 | 5.1 | 5.1 | 5.0 | 5.0 | 5.0 |

### Salinity correction factors for dissolved oxygen in water (based on conductivity)

| Temp<br>°C | Conductivity, in microsiemens per centimeter at 25 degrees Celsius |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|------------|--------------------------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|            | 0                                                                  | 1000  | 2000  | 3000  | 4000  | 5000  | 6000  | 7000  | 8000  | 9000  | 10000 | 11000 | 12000 | 13000 | 14000 | 15000 | 16000 |
| 0.0        | 1.000                                                              | 0.996 | 0.992 | 0.989 | 0.985 | 0.981 | 0.977 | 0.973 | 0.969 | 0.965 | 0.961 | 0.957 | 0.953 | 0.950 | 0.946 | 0.942 | 0.938 |
| 1.0        | 1.000                                                              | 0.996 | 0.992 | 0.989 | 0.985 | 0.981 | 0.977 | 0.973 | 0.969 | 0.965 | 0.962 | 0.958 | 0.954 | 0.950 | 0.946 | 0.942 | 0.938 |
| 2.0        | 1.000                                                              | 0.996 | 0.992 | 0.989 | 0.985 | 0.981 | 0.977 | 0.973 | 0.970 | 0.966 | 0.962 | 0.958 | 0.954 | 0.950 | 0.946 | 0.942 | 0.938 |
| 3.0        | 1.000                                                              | 0.996 | 0.993 | 0.989 | 0.985 | 0.981 | 0.977 | 0.974 | 0.970 | 0.966 | 0.962 | 0.958 | 0.954 | 0.951 | 0.947 | 0.943 | 0.939 |
| 4.0        | 1.000                                                              | 0.996 | 0.993 | 0.989 | 0.985 | 0.981 | 0.978 | 0.974 | 0.970 | 0.966 | 0.962 | 0.959 | 0.955 | 0.951 | 0.947 | 0.943 | 0.939 |
| 5.0        | 1.000                                                              | 0.996 | 0.993 | 0.989 | 0.985 | 0.981 | 0.978 | 0.974 | 0.970 | 0.966 | 0.963 | 0.959 | 0.955 | 0.951 | 0.947 | 0.944 | 0.940 |
| 6.0        | 1.000                                                              | 0.996 | 0.993 | 0.989 | 0.985 | 0.982 | 0.978 | 0.974 | 0.970 | 0.967 | 0.963 | 0.959 | 0.955 | 0.952 | 0.948 | 0.944 | 0.940 |
| 7.0        | 1.000                                                              | 0.996 | 0.993 | 0.989 | 0.985 | 0.982 | 0.978 | 0.974 | 0.971 | 0.967 | 0.963 | 0.959 | 0.956 | 0.952 | 0.948 | 0.944 | 0.941 |
| 8.0        | 1.000                                                              | 0.996 | 0.993 | 0.989 | 0.986 | 0.982 | 0.978 | 0.975 | 0.971 | 0.967 | 0.963 | 0.960 | 0.956 | 0.952 | 0.949 | 0.945 | 0.941 |
| 9.0        | 1.000                                                              | 0.996 | 0.993 | 0.989 | 0.986 | 0.982 | 0.978 | 0.975 | 0.971 | 0.967 | 0.964 | 0.960 | 0.956 | 0.953 | 0.949 | 0.945 | 0.941 |
| 10.0       | 1.000                                                              | 0.996 | 0.993 | 0.989 | 0.986 | 0.982 | 0.979 | 0.975 | 0.971 | 0.968 | 0.964 | 0.960 | 0.957 | 0.953 | 0.949 | 0.946 | 0.942 |
| 11.0       | 1.000                                                              | 0.996 | 0.993 | 0.989 | 0.986 | 0.982 | 0.979 | 0.975 | 0.971 | 0.968 | 0.964 | 0.961 | 0.957 | 0.953 | 0.950 | 0.946 | 0.942 |
| 12.0       | 1.000                                                              | 0.997 | 0.993 | 0.989 | 0.986 | 0.982 | 0.979 | 0.975 | 0.972 | 0.968 | 0.965 | 0.961 | 0.957 | 0.954 | 0.950 | 0.946 | 0.943 |
| 13.0       | 1.000                                                              | 0.997 | 0.993 | 0.990 | 0.986 | 0.983 | 0.979 | 0.975 | 0.972 | 0.968 | 0.965 | 0.961 | 0.958 | 0.954 | 0.950 | 0.947 | 0.943 |
| 14.0       | 1.000                                                              | 0.997 | 0.993 | 0.990 | 0.986 | 0.983 | 0.979 | 0.976 | 0.972 | 0.969 | 0.965 | 0.961 | 0.958 | 0.954 | 0.951 | 0.947 | 0.943 |
| 15.0       | 1.000                                                              | 0.997 | 0.993 | 0.990 | 0.986 | 0.983 | 0.979 | 0.976 | 0.972 | 0.969 | 0.965 | 0.962 | 0.958 | 0.955 | 0.951 | 0.947 | 0.944 |
| 16.0       | 1.000                                                              | 0.997 | 0.993 | 0.990 | 0.986 | 0.983 | 0.979 | 0.976 | 0.972 | 0.969 | 0.966 | 0.962 | 0.958 | 0.955 | 0.951 | 0.948 | 0.944 |
| 17.0       | 1.000                                                              | 0.997 | 0.993 | 0.990 | 0.986 | 0.983 | 0.980 | 0.976 | 0.973 | 0.969 | 0.966 | 0.962 | 0.959 | 0.955 | 0.952 | 0.948 | 0.945 |
| 18.0       | 1.000                                                              | 0.997 | 0.993 | 0.990 | 0.987 | 0.983 | 0.980 | 0.976 | 0.973 | 0.969 | 0.966 | 0.963 | 0.959 | 0.956 | 0.952 | 0.949 | 0.945 |
| 19.0       | 1.000                                                              | 0.997 | 0.993 | 0.990 | 0.987 | 0.983 | 0.980 | 0.976 | 0.973 | 0.970 | 0.966 | 0.963 | 0.959 | 0.956 | 0.952 | 0.949 | 0.945 |
| 20.0       | 1.000                                                              | 0.997 | 0.993 | 0.990 | 0.987 | 0.983 | 0.980 | 0.977 | 0.973 | 0.970 | 0.966 | 0.963 | 0.960 | 0.956 | 0.953 | 0.949 | 0.946 |
| 21.0       | 1.000                                                              | 0.997 | 0.993 | 0.990 | 0.987 | 0.984 | 0.980 | 0.977 | 0.973 | 0.970 | 0.967 | 0.963 | 0.960 | 0.957 | 0.953 | 0.950 | 0.946 |
| 22.0       | 1.000                                                              | 0.997 | 0.993 | 0.990 | 0.987 | 0.984 | 0.980 | 0.977 | 0.974 | 0.970 | 0.967 | 0.964 | 0.960 | 0.957 | 0.953 | 0.950 | 0.947 |
| 23.0       | 1.000                                                              | 0.997 | 0.994 | 0.990 | 0.987 | 0.984 | 0.980 | 0.977 | 0.974 | 0.971 | 0.967 | 0.964 | 0.960 | 0.957 | 0.954 | 0.950 | 0.947 |
| 24.0       | 1.000                                                              | 0.997 | 0.994 | 0.990 | 0.987 | 0.984 | 0.981 | 0.977 | 0.974 | 0.971 | 0.967 | 0.964 | 0.961 | 0.957 | 0.954 | 0.951 | 0.947 |
| 25.0       | 1.000                                                              | 0.997 | 0.994 | 0.990 | 0.987 | 0.984 | 0.981 | 0.977 | 0.974 | 0.971 | 0.968 | 0.964 | 0.961 | 0.958 | 0.954 | 0.951 | 0.948 |
| 26.0       | 1.000                                                              | 0.997 | 0.994 | 0.990 | 0.987 | 0.984 | 0.981 | 0.978 | 0.974 | 0.971 | 0.968 | 0.965 | 0.961 | 0.958 | 0.955 | 0.951 | 0.948 |
| 27.0       | 1.000                                                              | 0.997 | 0.994 | 0.991 | 0.987 | 0.984 | 0.981 | 0.978 | 0.975 | 0.971 | 0.968 | 0.965 | 0.962 | 0.958 | 0.955 | 0.952 | 0.948 |
| 28.0       | 1.000                                                              | 0.997 | 0.994 | 0.991 | 0.987 | 0.984 | 0.981 | 0.978 | 0.975 | 0.972 | 0.968 | 0.965 | 0.962 | 0.959 | 0.955 | 0.952 | 0.949 |
| 29.0       | 1.000                                                              | 0.997 | 0.994 | 0.991 | 0.988 | 0.984 | 0.981 | 0.978 | 0.975 | 0.972 | 0.969 | 0.965 | 0.962 | 0.959 | 0.956 | 0.952 | 0.949 |

## Salinity correction factors for dissolved oxygen in water (based on conductivity)—Continued

| Temp<br>°C | Conductivity, in microsiemens per centimeter at 25 degrees Celsius |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|------------|--------------------------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|            | 17000                                                              | 18000 | 19000 | 20000 | 21000 | 22000 | 23000 | 24000 | 25000 | 26000 | 27000 | 28000 | 29000 | 30000 | 31000 | 32000 | 33000 |
| 0.0        | 0.934                                                              | 0.930 | 0.926 | 0.922 | 0.918 | 0.914 | 0.910 | 0.905 | 0.901 | 0.897 | 0.893 | 0.889 | 0.885 | 0.881 | 0.877 | 0.873 | 0.869 |
| 1.0        | 0.934                                                              | 0.930 | 0.926 | 0.922 | 0.918 | 0.914 | 0.910 | 0.906 | 0.902 | 0.898 | 0.894 | 0.890 | 0.886 | 0.882 | 0.878 | 0.874 | 0.870 |
| 2.0        | 0.935                                                              | 0.931 | 0.927 | 0.923 | 0.919 | 0.915 | 0.911 | 0.907 | 0.903 | 0.899 | 0.895 | 0.891 | 0.887 | 0.883 | 0.879 | 0.875 | 0.871 |
| 3.0        | 0.935                                                              | 0.931 | 0.927 | 0.923 | 0.919 | 0.915 | 0.911 | 0.907 | 0.903 | 0.899 | 0.895 | 0.891 | 0.887 | 0.883 | 0.879 | 0.875 | 0.871 |
| 4.0        | 0.935                                                              | 0.932 | 0.928 | 0.924 | 0.920 | 0.916 | 0.912 | 0.908 | 0.904 | 0.900 | 0.896 | 0.892 | 0.888 | 0.884 | 0.880 | 0.876 | 0.872 |
| 5.0        | 0.936                                                              | 0.932 | 0.928 | 0.924 | 0.920 | 0.917 | 0.913 | 0.909 | 0.905 | 0.901 | 0.897 | 0.893 | 0.889 | 0.885 | 0.881 | 0.877 | 0.873 |
| 6.0        | 0.936                                                              | 0.933 | 0.929 | 0.925 | 0.921 | 0.917 | 0.913 | 0.909 | 0.905 | 0.902 | 0.898 | 0.894 | 0.890 | 0.886 | 0.882 | 0.878 | 0.874 |
| 7.0        | 0.937                                                              | 0.933 | 0.929 | 0.925 | 0.922 | 0.918 | 0.914 | 0.910 | 0.906 | 0.902 | 0.898 | 0.894 | 0.891 | 0.887 | 0.883 | 0.879 | 0.875 |
| 8.0        | 0.937                                                              | 0.933 | 0.930 | 0.926 | 0.922 | 0.918 | 0.914 | 0.911 | 0.907 | 0.903 | 0.899 | 0.895 | 0.891 | 0.887 | 0.884 | 0.880 | 0.876 |
| 9.0        | 0.938                                                              | 0.934 | 0.930 | 0.926 | 0.923 | 0.919 | 0.915 | 0.911 | 0.907 | 0.904 | 0.900 | 0.896 | 0.892 | 0.888 | 0.884 | 0.880 | 0.877 |
| 10.0       | 0.938                                                              | 0.934 | 0.931 | 0.927 | 0.923 | 0.919 | 0.916 | 0.912 | 0.908 | 0.904 | 0.900 | 0.897 | 0.893 | 0.889 | 0.885 | 0.881 | 0.877 |
| 11.0       | 0.939                                                              | 0.935 | 0.931 | 0.927 | 0.924 | 0.920 | 0.916 | 0.912 | 0.909 | 0.905 | 0.901 | 0.897 | 0.894 | 0.890 | 0.886 | 0.882 | 0.878 |
| 12.0       | 0.939                                                              | 0.935 | 0.932 | 0.928 | 0.924 | 0.920 | 0.917 | 0.913 | 0.909 | 0.906 | 0.902 | 0.898 | 0.894 | 0.890 | 0.887 | 0.883 | 0.879 |
| 13.0       | 0.939                                                              | 0.936 | 0.932 | 0.928 | 0.925 | 0.921 | 0.917 | 0.914 | 0.910 | 0.906 | 0.902 | 0.899 | 0.895 | 0.891 | 0.887 | 0.884 | 0.880 |
| 14.0       | 0.940                                                              | 0.936 | 0.933 | 0.929 | 0.925 | 0.922 | 0.918 | 0.914 | 0.911 | 0.907 | 0.903 | 0.899 | 0.896 | 0.892 | 0.888 | 0.884 | 0.881 |
| 15.0       | 0.940                                                              | 0.937 | 0.933 | 0.929 | 0.926 | 0.922 | 0.918 | 0.915 | 0.911 | 0.907 | 0.904 | 0.900 | 0.896 | 0.893 | 0.889 | 0.885 | 0.882 |
| 16.0       | 0.941                                                              | 0.937 | 0.934 | 0.930 | 0.926 | 0.923 | 0.919 | 0.915 | 0.912 | 0.908 | 0.904 | 0.901 | 0.897 | 0.893 | 0.890 | 0.886 | 0.882 |
| 17.0       | 0.941                                                              | 0.938 | 0.934 | 0.930 | 0.927 | 0.923 | 0.920 | 0.916 | 0.912 | 0.909 | 0.905 | 0.901 | 0.898 | 0.894 | 0.891 | 0.887 | 0.883 |
| 18.0       | 0.942                                                              | 0.938 | 0.934 | 0.931 | 0.927 | 0.924 | 0.920 | 0.917 | 0.913 | 0.909 | 0.906 | 0.902 | 0.899 | 0.895 | 0.891 | 0.888 | 0.884 |
| 19.0       | 0.942                                                              | 0.938 | 0.935 | 0.931 | 0.928 | 0.924 | 0.921 | 0.917 | 0.914 | 0.910 | 0.906 | 0.903 | 0.899 | 0.896 | 0.892 | 0.888 | 0.885 |
| 20.0       | 0.942                                                              | 0.939 | 0.935 | 0.932 | 0.928 | 0.925 | 0.921 | 0.918 | 0.914 | 0.911 | 0.907 | 0.903 | 0.900 | 0.896 | 0.893 | 0.889 | 0.886 |
| 21.0       | 0.943                                                              | 0.939 | 0.936 | 0.932 | 0.929 | 0.925 | 0.922 | 0.918 | 0.915 | 0.911 | 0.908 | 0.904 | 0.901 | 0.897 | 0.893 | 0.890 | 0.886 |
| 22.0       | 0.943                                                              | 0.940 | 0.936 | 0.933 | 0.929 | 0.926 | 0.922 | 0.919 | 0.915 | 0.912 | 0.908 | 0.905 | 0.901 | 0.898 | 0.894 | 0.891 | 0.887 |
| 23.0       | 0.944                                                              | 0.940 | 0.937 | 0.933 | 0.930 | 0.926 | 0.923 | 0.919 | 0.916 | 0.912 | 0.909 | 0.905 | 0.902 | 0.898 | 0.895 | 0.891 | 0.888 |
| 24.0       | 0.944                                                              | 0.941 | 0.937 | 0.934 | 0.930 | 0.927 | 0.923 | 0.920 | 0.917 | 0.913 | 0.910 | 0.906 | 0.903 | 0.899 | 0.896 | 0.892 | 0.889 |
| 25.0       | 0.944                                                              | 0.941 | 0.938 | 0.934 | 0.931 | 0.927 | 0.924 | 0.921 | 0.917 | 0.914 | 0.910 | 0.907 | 0.903 | 0.900 | 0.896 | 0.893 | 0.889 |
| 26.0       | 0.945                                                              | 0.941 | 0.938 | 0.935 | 0.931 | 0.928 | 0.925 | 0.921 | 0.918 | 0.914 | 0.911 | 0.907 | 0.904 | 0.901 | 0.897 | 0.894 | 0.890 |
| 27.0       | 0.945                                                              | 0.942 | 0.938 | 0.935 | 0.932 | 0.928 | 0.925 | 0.922 | 0.918 | 0.915 | 0.911 | 0.908 | 0.905 | 0.901 | 0.898 | 0.894 | 0.891 |
| 28.0       | 0.946                                                              | 0.942 | 0.939 | 0.936 | 0.932 | 0.929 | 0.926 | 0.922 | 0.919 | 0.915 | 0.912 | 0.909 | 0.905 | 0.902 | 0.898 | 0.895 | 0.892 |
| 29.0       | 0.946                                                              | 0.943 | 0.939 | 0.936 | 0.933 | 0.929 | 0.926 | 0.923 | 0.919 | 0.916 | 0.913 | 0.909 | 0.906 | 0.903 | 0.899 | 0.896 | 0.892 |

## Salinity correction factors for dissolved oxygen in water (based on conductivity) - Continued

| Temp<br>°C | Conductivity, in microsiemens per centimeter at 25 degrees Celsius |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|------------|--------------------------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|            | 34000                                                              | 35000 | 36000 | 37000 | 38000 | 39000 | 40000 | 41000 | 42000 | 43000 | 44000 | 45000 | 46000 | 47000 | 48000 | 49000 | 50000 |
| 0.0        | 0.865                                                              | 0.861 | 0.856 | 0.852 | 0.848 | 0.844 | 0.840 | 0.836 | 0.832 | 0.828 | 0.823 | 0.819 | 0.815 | 0.811 | 0.807 | 0.803 | 0.799 |
| 1.0        | 0.866                                                              | 0.862 | 0.857 | 0.853 | 0.849 | 0.845 | 0.841 | 0.837 | 0.833 | 0.829 | 0.825 | 0.821 | 0.816 | 0.812 | 0.808 | 0.804 | 0.800 |
| 2.0        | 0.867                                                              | 0.862 | 0.858 | 0.854 | 0.850 | 0.846 | 0.842 | 0.838 | 0.834 | 0.830 | 0.826 | 0.822 | 0.818 | 0.814 | 0.809 | 0.805 | 0.801 |
| 3.0        | 0.867                                                              | 0.863 | 0.859 | 0.855 | 0.851 | 0.847 | 0.843 | 0.839 | 0.835 | 0.831 | 0.827 | 0.823 | 0.819 | 0.815 | 0.811 | 0.807 | 0.803 |
| 4.0        | 0.868                                                              | 0.864 | 0.860 | 0.856 | 0.852 | 0.848 | 0.844 | 0.840 | 0.836 | 0.832 | 0.828 | 0.824 | 0.820 | 0.816 | 0.812 | 0.808 | 0.804 |
| 5.0        | 0.869                                                              | 0.865 | 0.861 | 0.857 | 0.853 | 0.849 | 0.845 | 0.841 | 0.837 | 0.833 | 0.829 | 0.825 | 0.821 | 0.817 | 0.813 | 0.809 | 0.805 |
| 6.0        | 0.870                                                              | 0.866 | 0.862 | 0.858 | 0.854 | 0.850 | 0.846 | 0.842 | 0.838 | 0.834 | 0.830 | 0.826 | 0.822 | 0.818 | 0.814 | 0.810 | 0.806 |
| 7.0        | 0.871                                                              | 0.867 | 0.863 | 0.859 | 0.855 | 0.851 | 0.847 | 0.843 | 0.839 | 0.835 | 0.831 | 0.828 | 0.824 | 0.820 | 0.816 | 0.812 | 0.808 |
| 8.0        | 0.872                                                              | 0.868 | 0.864 | 0.860 | 0.856 | 0.852 | 0.848 | 0.844 | 0.840 | 0.837 | 0.833 | 0.829 | 0.825 | 0.821 | 0.817 | 0.813 | 0.809 |
| 9.0        | 0.873                                                              | 0.869 | 0.865 | 0.861 | 0.857 | 0.853 | 0.849 | 0.845 | 0.842 | 0.838 | 0.834 | 0.830 | 0.826 | 0.822 | 0.818 | 0.814 | 0.810 |
| 10.0       | 0.874                                                              | 0.870 | 0.866 | 0.862 | 0.858 | 0.854 | 0.850 | 0.846 | 0.843 | 0.839 | 0.835 | 0.831 | 0.827 | 0.823 | 0.819 | 0.815 | 0.811 |
| 11.0       | 0.874                                                              | 0.871 | 0.867 | 0.863 | 0.859 | 0.855 | 0.851 | 0.848 | 0.844 | 0.840 | 0.836 | 0.832 | 0.828 | 0.824 | 0.820 | 0.817 | 0.813 |
| 12.0       | 0.875                                                              | 0.871 | 0.868 | 0.864 | 0.860 | 0.856 | 0.852 | 0.849 | 0.845 | 0.841 | 0.837 | 0.833 | 0.829 | 0.825 | 0.822 | 0.818 | 0.814 |
| 13.0       | 0.876                                                              | 0.872 | 0.869 | 0.865 | 0.861 | 0.857 | 0.853 | 0.850 | 0.846 | 0.842 | 0.838 | 0.834 | 0.830 | 0.827 | 0.823 | 0.819 | 0.815 |
| 14.0       | 0.877                                                              | 0.873 | 0.869 | 0.866 | 0.862 | 0.858 | 0.854 | 0.851 | 0.847 | 0.843 | 0.839 | 0.835 | 0.832 | 0.828 | 0.824 | 0.820 | 0.816 |
| 15.0       | 0.878                                                              | 0.874 | 0.870 | 0.867 | 0.863 | 0.859 | 0.855 | 0.852 | 0.848 | 0.844 | 0.840 | 0.836 | 0.833 | 0.829 | 0.825 | 0.821 | 0.817 |
| 16.0       | 0.879                                                              | 0.875 | 0.871 | 0.867 | 0.864 | 0.860 | 0.856 | 0.853 | 0.849 | 0.845 | 0.841 | 0.838 | 0.834 | 0.830 | 0.826 | 0.822 | 0.819 |
| 17.0       | 0.879                                                              | 0.876 | 0.872 | 0.868 | 0.865 | 0.861 | 0.857 | 0.854 | 0.850 | 0.846 | 0.842 | 0.839 | 0.835 | 0.831 | 0.827 | 0.824 | 0.820 |
| 18.0       | 0.880                                                              | 0.877 | 0.873 | 0.869 | 0.866 | 0.862 | 0.858 | 0.855 | 0.851 | 0.847 | 0.843 | 0.840 | 0.836 | 0.832 | 0.829 | 0.825 | 0.821 |
| 19.0       | 0.881                                                              | 0.877 | 0.874 | 0.870 | 0.867 | 0.863 | 0.859 | 0.855 | 0.852 | 0.848 | 0.844 | 0.841 | 0.837 | 0.833 | 0.830 | 0.826 | 0.822 |
| 20.0       | 0.882                                                              | 0.878 | 0.875 | 0.871 | 0.867 | 0.864 | 0.860 | 0.856 | 0.853 | 0.849 | 0.845 | 0.842 | 0.838 | 0.834 | 0.831 | 0.827 | 0.823 |
| 21.0       | 0.883                                                              | 0.879 | 0.876 | 0.872 | 0.868 | 0.865 | 0.861 | 0.857 | 0.854 | 0.850 | 0.846 | 0.843 | 0.839 | 0.836 | 0.832 | 0.828 | 0.825 |
| 22.0       | 0.884                                                              | 0.880 | 0.876 | 0.873 | 0.869 | 0.866 | 0.862 | 0.858 | 0.855 | 0.851 | 0.848 | 0.844 | 0.840 | 0.837 | 0.833 | 0.829 | 0.826 |
| 23.0       | 0.884                                                              | 0.881 | 0.877 | 0.874 | 0.870 | 0.866 | 0.863 | 0.859 | 0.856 | 0.852 | 0.849 | 0.845 | 0.841 | 0.838 | 0.834 | 0.830 | 0.827 |
| 24.0       | 0.885                                                              | 0.882 | 0.878 | 0.874 | 0.871 | 0.867 | 0.864 | 0.860 | 0.857 | 0.853 | 0.850 | 0.846 | 0.842 | 0.839 | 0.835 | 0.832 | 0.828 |
| 25.0       | 0.886                                                              | 0.882 | 0.879 | 0.875 | 0.872 | 0.868 | 0.865 | 0.861 | 0.858 | 0.854 | 0.851 | 0.847 | 0.843 | 0.840 | 0.836 | 0.833 | 0.829 |
| 26.0       | 0.887                                                              | 0.883 | 0.880 | 0.876 | 0.873 | 0.869 | 0.866 | 0.862 | 0.859 | 0.855 | 0.852 | 0.848 | 0.844 | 0.841 | 0.837 | 0.834 | 0.830 |
| 27.0       | 0.887                                                              | 0.884 | 0.880 | 0.877 | 0.874 | 0.870 | 0.867 | 0.863 | 0.860 | 0.856 | 0.853 | 0.849 | 0.845 | 0.842 | 0.838 | 0.835 | 0.831 |
| 28.0       | 0.888                                                              | 0.885 | 0.881 | 0.878 | 0.874 | 0.871 | 0.867 | 0.864 | 0.860 | 0.857 | 0.853 | 0.850 | 0.846 | 0.843 | 0.839 | 0.836 | 0.832 |
| 29.0       | 0.889                                                              | 0.886 | 0.882 | 0.879 | 0.875 | 0.872 | 0.868 | 0.865 | 0.861 | 0.858 | 0.854 | 0.851 | 0.848 | 0.844 | 0.841 | 0.837 | 0.834 |

## Salinity correction factors for dissolved oxygen in water (based on conductivity) - Continued

| Temp<br>°C | Conductivity, in microsiemens per centimeter at 25 degrees Celsius |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|------------|--------------------------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|            | 51000                                                              | 52000 | 53000 | 54000 | 55000 | 56000 | 57000 | 58000 | 59000 | 60000 | 61000 | 62000 | 63000 | 64000 | 65000 | 66000 | 67000 |
| 0.0        | 0.795                                                              | 0.790 | 0.786 | 0.782 | 0.778 | 0.774 | 0.770 | 0.766 | 0.761 | 0.757 | 0.753 | 0.749 | 0.745 | 0.741 | 0.737 | 0.732 | 0.728 |
| 1.0        | 0.796                                                              | 0.792 | 0.788 | 0.783 | 0.779 | 0.775 | 0.771 | 0.767 | 0.763 | 0.759 | 0.755 | 0.751 | 0.746 | 0.742 | 0.738 | 0.734 | 0.730 |
| 2.0        | 0.797                                                              | 0.793 | 0.789 | 0.785 | 0.781 | 0.777 | 0.773 | 0.768 | 0.764 | 0.760 | 0.756 | 0.752 | 0.748 | 0.744 | 0.740 | 0.736 | 0.732 |
| 3.0        | 0.798                                                              | 0.794 | 0.790 | 0.786 | 0.782 | 0.778 | 0.774 | 0.770 | 0.766 | 0.762 | 0.758 | 0.754 | 0.750 | 0.746 | 0.741 | 0.737 | 0.733 |
| 4.0        | 0.800                                                              | 0.796 | 0.792 | 0.788 | 0.784 | 0.780 | 0.775 | 0.771 | 0.767 | 0.763 | 0.759 | 0.755 | 0.751 | 0.747 | 0.743 | 0.739 | 0.735 |
| 5.0        | 0.801                                                              | 0.797 | 0.793 | 0.789 | 0.785 | 0.781 | 0.777 | 0.773 | 0.769 | 0.765 | 0.761 | 0.757 | 0.753 | 0.749 | 0.745 | 0.741 | 0.737 |
| 6.0        | 0.802                                                              | 0.798 | 0.794 | 0.790 | 0.786 | 0.782 | 0.778 | 0.774 | 0.770 | 0.766 | 0.762 | 0.758 | 0.754 | 0.750 | 0.746 | 0.742 | 0.738 |
| 7.0        | 0.804                                                              | 0.800 | 0.796 | 0.792 | 0.788 | 0.784 | 0.780 | 0.776 | 0.772 | 0.768 | 0.764 | 0.760 | 0.756 | 0.752 | 0.748 | 0.744 | 0.740 |
| 8.0        | 0.805                                                              | 0.801 | 0.797 | 0.793 | 0.789 | 0.785 | 0.781 | 0.777 | 0.773 | 0.769 | 0.765 | 0.761 | 0.757 | 0.753 | 0.749 | 0.745 | 0.742 |
| 9.0        | 0.806                                                              | 0.802 | 0.798 | 0.794 | 0.790 | 0.787 | 0.783 | 0.779 | 0.775 | 0.771 | 0.767 | 0.763 | 0.759 | 0.755 | 0.751 | 0.747 | 0.743 |
| 10.0       | 0.807                                                              | 0.804 | 0.800 | 0.796 | 0.792 | 0.788 | 0.784 | 0.780 | 0.776 | 0.772 | 0.768 | 0.764 | 0.760 | 0.757 | 0.753 | 0.749 | 0.745 |
| 11.0       | 0.809                                                              | 0.805 | 0.801 | 0.797 | 0.793 | 0.789 | 0.785 | 0.781 | 0.778 | 0.774 | 0.770 | 0.766 | 0.762 | 0.758 | 0.754 | 0.750 | 0.746 |
| 12.0       | 0.810                                                              | 0.806 | 0.802 | 0.798 | 0.794 | 0.791 | 0.787 | 0.783 | 0.779 | 0.775 | 0.771 | 0.767 | 0.763 | 0.760 | 0.756 | 0.752 | 0.748 |
| 13.0       | 0.811                                                              | 0.807 | 0.804 | 0.800 | 0.796 | 0.792 | 0.788 | 0.784 | 0.780 | 0.777 | 0.773 | 0.769 | 0.765 | 0.761 | 0.757 | 0.753 | 0.750 |
| 14.0       | 0.812                                                              | 0.809 | 0.805 | 0.801 | 0.797 | 0.793 | 0.789 | 0.786 | 0.782 | 0.778 | 0.774 | 0.770 | 0.766 | 0.763 | 0.759 | 0.755 | 0.751 |
| 15.0       | 0.814                                                              | 0.810 | 0.806 | 0.802 | 0.798 | 0.795 | 0.791 | 0.787 | 0.783 | 0.779 | 0.776 | 0.772 | 0.768 | 0.764 | 0.760 | 0.756 | 0.753 |
| 16.0       | 0.815                                                              | 0.811 | 0.807 | 0.804 | 0.800 | 0.796 | 0.792 | 0.788 | 0.785 | 0.781 | 0.777 | 0.773 | 0.769 | 0.766 | 0.762 | 0.758 | 0.754 |
| 17.0       | 0.816                                                              | 0.812 | 0.809 | 0.805 | 0.801 | 0.797 | 0.794 | 0.790 | 0.786 | 0.782 | 0.778 | 0.775 | 0.771 | 0.767 | 0.763 | 0.760 | 0.756 |
| 18.0       | 0.817                                                              | 0.814 | 0.810 | 0.806 | 0.802 | 0.799 | 0.795 | 0.791 | 0.787 | 0.784 | 0.780 | 0.776 | 0.772 | 0.769 | 0.765 | 0.761 | 0.757 |
| 19.0       | 0.819                                                              | 0.815 | 0.811 | 0.807 | 0.804 | 0.800 | 0.796 | 0.792 | 0.789 | 0.785 | 0.781 | 0.777 | 0.774 | 0.770 | 0.766 | 0.763 | 0.759 |
| 20.0       | 0.820                                                              | 0.816 | 0.812 | 0.809 | 0.805 | 0.801 | 0.797 | 0.794 | 0.790 | 0.786 | 0.783 | 0.779 | 0.775 | 0.771 | 0.768 | 0.764 | 0.760 |
| 21.0       | 0.821                                                              | 0.817 | 0.814 | 0.810 | 0.806 | 0.802 | 0.799 | 0.795 | 0.791 | 0.788 | 0.784 | 0.780 | 0.777 | 0.773 | 0.769 | 0.766 | 0.762 |
| 22.0       | 0.822                                                              | 0.818 | 0.815 | 0.811 | 0.807 | 0.804 | 0.800 | 0.796 | 0.793 | 0.789 | 0.785 | 0.782 | 0.778 | 0.774 | 0.771 | 0.767 | 0.763 |
| 23.0       | 0.823                                                              | 0.820 | 0.816 | 0.812 | 0.809 | 0.805 | 0.801 | 0.798 | 0.794 | 0.790 | 0.787 | 0.783 | 0.779 | 0.776 | 0.772 | 0.768 | 0.765 |
| 24.0       | 0.824                                                              | 0.821 | 0.817 | 0.814 | 0.810 | 0.806 | 0.803 | 0.799 | 0.795 | 0.792 | 0.788 | 0.785 | 0.781 | 0.777 | 0.774 | 0.770 | 0.766 |
| 25.0       | 0.826                                                              | 0.822 | 0.818 | 0.815 | 0.811 | 0.808 | 0.804 | 0.800 | 0.797 | 0.793 | 0.789 | 0.786 | 0.782 | 0.779 | 0.775 | 0.771 | 0.768 |
| 26.0       | 0.827                                                              | 0.823 | 0.820 | 0.816 | 0.812 | 0.809 | 0.805 | 0.802 | 0.798 | 0.794 | 0.791 | 0.787 | 0.784 | 0.780 | 0.776 | 0.773 | 0.769 |
| 27.0       | 0.828                                                              | 0.824 | 0.821 | 0.817 | 0.814 | 0.810 | 0.806 | 0.803 | 0.799 | 0.796 | 0.792 | 0.789 | 0.785 | 0.781 | 0.778 | 0.774 | 0.771 |
| 28.0       | 0.829                                                              | 0.825 | 0.822 | 0.818 | 0.815 | 0.811 | 0.808 | 0.804 | 0.801 | 0.797 | 0.794 | 0.790 | 0.786 | 0.783 | 0.779 | 0.776 | 0.772 |
| 29.0       | 0.830                                                              | 0.827 | 0.823 | 0.820 | 0.816 | 0.812 | 0.809 | 0.805 | 0.802 | 0.798 | 0.795 | 0.791 | 0.788 | 0.784 | 0.781 | 0.777 | 0.774 |

## Salinity correction factors for dissolved oxygen in water (based on conductivity) - Continued

| Temp<br>°C | Conductivity, in microsiemens per centimeter at 25 degrees Celsius |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |  |
|------------|--------------------------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--|
|            | 0                                                                  | 1000  | 2000  | 3000  | 4000  | 5000  | 6000  | 7000  | 8000  | 9000  | 10000 | 11000 | 12000 | 13000 | 14000 | 15000 | 16000 |  |
| 30.0       | 1.000                                                              | 0.997 | 0.994 | 0.991 | 0.988 | 0.985 | 0.981 | 0.978 | 0.975 | 0.972 | 0.969 | 0.966 | 0.962 | 0.959 | 0.956 | 0.953 | 0.950 |  |
| 31.0       | 1.000                                                              | 0.997 | 0.994 | 0.991 | 0.988 | 0.985 | 0.982 | 0.978 | 0.975 | 0.972 | 0.969 | 0.966 | 0.963 | 0.959 | 0.956 | 0.953 | 0.950 |  |
| 32.0       | 1.000                                                              | 0.997 | 0.994 | 0.991 | 0.988 | 0.985 | 0.982 | 0.979 | 0.975 | 0.972 | 0.969 | 0.966 | 0.963 | 0.960 | 0.957 | 0.953 | 0.950 |  |
| 33.0       | 1.000                                                              | 0.997 | 0.994 | 0.991 | 0.988 | 0.985 | 0.982 | 0.979 | 0.976 | 0.973 | 0.969 | 0.966 | 0.963 | 0.960 | 0.957 | 0.954 | 0.951 |  |
| 34.0       | 1.000                                                              | 0.997 | 0.994 | 0.991 | 0.988 | 0.985 | 0.982 | 0.979 | 0.976 | 0.973 | 0.970 | 0.967 | 0.963 | 0.960 | 0.957 | 0.954 | 0.951 |  |
| 35.0       | 1.000                                                              | 0.997 | 0.994 | 0.991 | 0.988 | 0.985 | 0.982 | 0.979 | 0.976 | 0.973 | 0.970 | 0.967 | 0.964 | 0.961 | 0.957 | 0.954 | 0.951 |  |

| Temp<br>°C | Conductivity, in microsiemens per centimeter at 25 degrees Celsius |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |  |
|------------|--------------------------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--|
|            | 17000                                                              | 18000 | 19000 | 20000 | 21000 | 22000 | 23000 | 24000 | 25000 | 26000 | 27000 | 28000 | 29000 | 30000 | 31000 | 32000 | 33000 |  |
| 30.0       | 0.946                                                              | 0.943 | 0.940 | 0.936 | 0.933 | 0.930 | 0.927 | 0.923 | 0.920 | 0.917 | 0.913 | 0.910 | 0.907 | 0.903 | 0.900 | 0.896 | 0.893 |  |
| 31.0       | 0.947                                                              | 0.943 | 0.940 | 0.937 | 0.934 | 0.930 | 0.927 | 0.924 | 0.920 | 0.917 | 0.914 | 0.911 | 0.907 | 0.904 | 0.901 | 0.897 | 0.894 |  |
| 32.0       | 0.947                                                              | 0.944 | 0.941 | 0.937 | 0.934 | 0.931 | 0.928 | 0.924 | 0.921 | 0.918 | 0.914 | 0.911 | 0.908 | 0.905 | 0.901 | 0.898 | 0.895 |  |
| 33.0       | 0.947                                                              | 0.944 | 0.941 | 0.938 | 0.935 | 0.931 | 0.928 | 0.925 | 0.922 | 0.918 | 0.915 | 0.912 | 0.908 | 0.905 | 0.902 | 0.899 | 0.895 |  |
| 34.0       | 0.948                                                              | 0.945 | 0.941 | 0.938 | 0.935 | 0.932 | 0.929 | 0.925 | 0.922 | 0.919 | 0.916 | 0.912 | 0.909 | 0.906 | 0.903 | 0.899 | 0.896 |  |
| 35.0       | 0.948                                                              | 0.945 | 0.942 | 0.939 | 0.935 | 0.932 | 0.929 | 0.926 | 0.923 | 0.919 | 0.916 | 0.913 | 0.910 | 0.906 | 0.903 | 0.900 | 0.897 |  |

| Temp<br>°C | Conductivity, in microsiemens per centimeter at 25 degrees Celsius |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |  |
|------------|--------------------------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--|
|            | 34000                                                              | 35000 | 36000 | 37000 | 38000 | 39000 | 40000 | 41000 | 42000 | 43000 | 44000 | 45000 | 46000 | 47000 | 48000 | 49000 | 50000 |  |
| 30.0       | 0.890                                                              | 0.886 | 0.883 | 0.879 | 0.876 | 0.873 | 0.869 | 0.866 | 0.862 | 0.859 | 0.855 | 0.852 | 0.849 | 0.845 | 0.842 | 0.838 | 0.835 |  |
| 31.0       | 0.890                                                              | 0.887 | 0.884 | 0.880 | 0.877 | 0.873 | 0.870 | 0.867 | 0.863 | 0.860 | 0.856 | 0.853 | 0.850 | 0.846 | 0.843 | 0.839 | 0.836 |  |
| 32.0       | 0.891                                                              | 0.888 | 0.884 | 0.881 | 0.878 | 0.874 | 0.871 | 0.868 | 0.864 | 0.861 | 0.857 | 0.854 | 0.851 | 0.847 | 0.844 | 0.840 | 0.837 |  |
| 33.0       | 0.892                                                              | 0.889 | 0.885 | 0.882 | 0.879 | 0.875 | 0.872 | 0.868 | 0.865 | 0.862 | 0.858 | 0.855 | 0.851 | 0.848 | 0.845 | 0.841 | 0.838 |  |
| 34.0       | 0.893                                                              | 0.889 | 0.886 | 0.883 | 0.879 | 0.876 | 0.873 | 0.869 | 0.866 | 0.863 | 0.859 | 0.856 | 0.852 | 0.849 | 0.846 | 0.842 | 0.839 |  |
| 35.0       | 0.893                                                              | 0.890 | 0.887 | 0.883 | 0.880 | 0.877 | 0.874 | 0.870 | 0.867 | 0.863 | 0.860 | 0.857 | 0.853 | 0.850 | 0.847 | 0.843 | 0.840 |  |

| Temp<br>°C | Conductivity, in microsiemens per centimeter at 25 degrees Celsius |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |  |
|------------|--------------------------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--|
|            | 51000                                                              | 52000 | 53000 | 54000 | 55000 | 56000 | 57000 | 58000 | 59000 | 60000 | 61000 | 62000 | 63000 | 64000 | 65000 | 66000 | 67000 |  |
| 30.0       | 0.831                                                              | 0.828 | 0.824 | 0.821 | 0.817 | 0.814 | 0.810 | 0.807 | 0.803 | 0.800 | 0.796 | 0.793 | 0.789 | 0.786 | 0.782 | 0.779 | 0.775 |  |
| 31.0       | 0.832                                                              | 0.829 | 0.825 | 0.822 | 0.818 | 0.815 | 0.811 | 0.808 | 0.804 | 0.801 | 0.797 | 0.794 | 0.790 | 0.787 | 0.783 | 0.780 | 0.776 |  |
| 32.0       | 0.833                                                              | 0.830 | 0.826 | 0.823 | 0.820 | 0.816 | 0.813 | 0.809 | 0.806 | 0.802 | 0.799 | 0.795 | 0.792 | 0.788 | 0.785 | 0.781 | 0.778 |  |
| 33.0       | 0.834                                                              | 0.831 | 0.828 | 0.824 | 0.821 | 0.817 | 0.814 | 0.810 | 0.807 | 0.803 | 0.800 | 0.797 | 0.793 | 0.790 | 0.786 | 0.783 | 0.779 |  |
| 34.0       | 0.836                                                              | 0.832 | 0.829 | 0.825 | 0.822 | 0.818 | 0.815 | 0.812 | 0.808 | 0.805 | 0.801 | 0.798 | 0.794 | 0.791 | 0.788 | 0.784 | 0.781 |  |
| 35.0       | 0.837                                                              | 0.833 | 0.830 | 0.826 | 0.823 | 0.820 | 0.816 | 0.813 | 0.809 | 0.806 | 0.803 | 0.799 | 0.796 | 0.792 | 0.789 | 0.785 | 0.782 |  |



## **Abstract**

This research was carried out with the goal of experimental investigation of Micro-Nano bubbles (MNBs) impact on improving the aerobic treatment of wastewater taken from Shahrood swage facilities. At the first step, the production methods and characteristics of MNBs were studied. The water enriched with MNBs using a generator made by Minab Toos Co. (Model T2S1-375, registration No. 83998).

To compare the oxygen concentrations and other properties of water enriched with MNBs versus the conventional ceramic aerator, some preliminary tests were performed. The result showed that volumetric oxygen transfer coefficient in MNB system was approximately 7 times more than ceramic aerator. The reason behind this, could be size of bubbles and gas solution in MNBs. Furthermore, it was shown that MNBs are more stable than the bubbles generated from ceramic aerators.

Other qualitative experiments on wastewater of Shahrood refinery showed that BOD<sub>5</sub>, COD, TDS, EC and turbidity in the treated wastewater by MNBs were less than ceramic aerator system samples. It should be noted that the pH in both samples were almost equal in the wastewater treated samples while pH in water with MNBs was higher than those from ceramic aerator.

**Keywords:** Wastewater treatment, Micro-nano bubble, Nano fluid, Volumetric oxygen transfer coefficient, Biological oxygen demand.



**Shahrood University of Technology**  
**Department of Civil Engineering**

**Thesis for Master of Science in Water Engineering**

**Experimental investigation on the effect of micro-nano air bubbles on the improvement  
of aerobic treatment of sewage (Case study: Shahrood municipal wastewater)**

**Written by**  
**Morteza Karimi Andani**

**Supervisor**  
**Seyed Fazlolah Saghravani**

**September 2016**