# Potential Application of Reclaimed Water for Potable Reuse: Part II- Technical and Regulatory Issues

*M. Kayhanian[1],G. Tchobanoglous[2]*

1. Prof., Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, Davis, CA 95616 (Corresponding Author) mdkayhanian@ucdavis.edu
2. Prof., Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, Davis, CA 95616 gtchobanoglous@ucdavis.edu

*(Received Apr. 11, 2018 Accepted June 7, 2018)*

**To cite this article :**
Kayhanian, M. and Tchobanoglous, G., 2018, "potential application of reclaimed water for potable reuse: part II- technical and regulatory issues." Journal of Water and Wastewater, 29 (4), 23-60 Doi:10.22093/wwj.2018.101905.981. (In Persian)

## Abstract

This paper (Part II) is the second in a series of three papers on water reuse and the potential application of potable water reuse in Iran. Introductory and background material on potable reuse was presented in Part I. The principal focus of this paper (Part II) is on the technical and regulatory issues that must be considered in implementing a potable water reuse program. Topics addressed in this paper include: 1) public health considerations in potable reuse, 2) representative advanced treatment trains used in potable reuse, 3) the importance of source control, 4) upgrade to secondary wastewater treatment plant for potable reuse, and 5) environmental buffer for potable reuse. The path forward and implementation challenges, including public outreach, are addressed in Part III.

***Keywords:*** Water Reuse, Potable Reuse, Indirect Potable Reuse, Direct Potable Reuse, Source Control, Secondary Wastewater Treatment, Design and Operations Upgrade, Environmental Buffer, Public Health and Regulatory Issues.

dx.doi.org/10.22093/wwj.2018.101905.981


# پتانسیل استفاده مجدد از آب برای مصارف خانگی
# بخش دوم- مسائل فنی و مقررات مربوط به سلامت عمومی

مسعود کیهانیان[۱]، جورج چوبانوگلوس[۲]

۱- استاد، بخش مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه کالیفرنیا، دیویس، کالیفرنیا، آمریکا
(نویسنده مسئول) mdkayhanian@ucdavis.edu
۲- استاد، بخش مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه کالیفرنیا، دیویس، کالیفرنیا، آمریکا
gtchobanoglous@ucdavis.edu

(دریافت ۹۷/۱/۲۲ پذیرش ۹۷/۳/۱۷)

**برای ارجاع به این مقاله به صورت زیر اقدام بفرمایید:**
کیهانیان، م.، چوبانوگلوس، ج.، ۱۳۹۷، " پتانسیل استفاده مجدد از آب برای مصارف خانگی در ایران: بخش دوم - مسائل فنّی و مقرّرات مربوط به سلامت عمومی" مجله آب و فاضلاب، ۲۹ (۴)، ۶۰-۲۳. **Doi: 10.22093/wwj.2018.101905.981**

## چکیده

**این مقاله، دومین بخش از سری مقالاتی است که در مورد استفاده مجدد از آب و پتانسیل کاربرد آن برای مصارف خانگی نوشته شده است. در بخش اول مقاله اطلاعات مقدماتی مورد نیاز در مورد دلایل و ضرورت‌های استفاده مجدد در مصارف خانگی و همچنین ارزیابی آب بازیافتی و مقایسه با منابع آبی دیگر ارائه شد. هدف اصلی در بخش دوم، بررسی مسائل فنی و مقررات مربوط به سلامت عمومی است که هنگام استفاده مجدد از آب برای مصارف خانگی باید مورد توجه قرار گیرد. عناوین مورد بحث در این مقاله شامل موارد زیر است: ۱) الزامات مربوط به سلامت عمومی در استفاده مجدد از آب برای مصارف خانگی، ۲) نقش سلسله تصفیه‌هایی که در استفاده مجدد از آب برای مصارف خانگی به کار گرفته می‌شود، ۳) اهمیت کنترل آلاینده‌ها از منشأ تولید، ۴) ارتقای تصفیه‌خانه فاضلاب ثانویه برای استفاده مجدد آب برای مصارف خانگی، و ۵) حائل محیط زیستی برای استفاده مجدد از آب برای مصارف خانگی. چگونگی پیشبرد این امر و چالش‌های به‌کارگیری، از جمله ارتباط عمومی در ارتقای دانش مردم، در بخش سوم مورد بحث قرار گرفته‌اند.**

***واژه‌های کلیدی***: استفاده مجدد از آب، استفاده مستقیم و غیر مستقیم از آب برای مصارف خانگی، کنترل آلاینده‌ها از منشأ تولید، ارتقای طراحی و بهره‌برداری تصفیه ثانویه فاضلاب، حائل محیط زیستی، مقررات مرتبط با سلامت عمومی

## ۱- مقدمه

در مقاله اول اشاره شد که سه عنصر اصلی استفاده مجدد از آب برای مصارف خانگی عبارت اند از: عنصر فنی، عنصر مقررات قانونی و عنصر ارتباط عمومی. در این بخش از مقاله مسائل فنی و مقررات مربوط به سلامت عموم مورد بحث قرار می‌گیرد. از نظر فنی، برای استفاده مجدد موفق از آب در مصارف خانگی، طراحی عملکرد مناسب تأسیسات تصفیه پیشرفته آب ضروری است. منظور از عملکرد مناسب، عملکردی است که به تولید آبی با استانداردهای کیفی بیانجامد و همچنین در چارچوب مقررات و قوانین محلی باشد. به‌طور کلی، در تأسیسات تصفیه پیشرفته آب، از چهار نوع فرایند تصفیه‌ای استفاده می‌شود: ۱) فرایندهایی که برای حذف ذرات و کلوئیدها به‌کار می‌روند، ۲) فرایندهایی که برای حذف کل مواد جامد محلول[۱] به‌کار می‌روند و ذرات بسیار ریز خاصی را هدف قرار می‌دهند، ۳) فرایندهایی که برای حصول اطمینان از گندزدایی عوامل بیماری‌زا و برای حفظ سلامت عمومی استفاده می‌شوند، و ۴) فرایندهایی که برای تثبیت و پایدارسازی پیشرفته آب تصفیه شده[۲] استفاده می‌شوند. موضوعات بررسی شده در این مقاله در ارتباط با مسائل فنی و مقررات مربوط به سلامت

[1] Total Disolved Solids (TDS)
[2] Advanced Treated Water (ATW)

عمومی شامل موارد زیر است: ۱) مسائل مربوط به سلامت عمومی در استفاده مجدد از آب برای مصارف خانگی، ۲) نمونه‌ای از تصفیه‌های پیشرفته‌ای که در استفاده مجدد از آب برای مصارف خانگی به کار می‌روند، ۳) اهمیت کنترل آلاینده‌ها از منشأ تولید، ۴) ارتقای تصفیه‌خانه ثانویه فاضلاب به‌منظور استفاده مجدد از آب برای مصارف خانگی، و ۵) استفاده از حائل محیط زیستی برای استفاده مجدد[1] از آب برای مصارف خانگی.

## ۲- مسائل مربوط به سلامت عمومی در استفاده مجدد از آب برای مصارف خانگی

از نظر سلامت عمومی، اهداف AWTF، حذف خطرات جدی مانند خطرات بیماری‌زای میکربی و خطرات عناصر شیمیایی است. از این رو، برای حفظ سلامت عمومی، مراحل مختلف تصفیه به‌صورت زنجیره‌ای انتخاب و به‌کار می‌رود که معمولاً توسط مقررات و الزامات قانونی هدایت می‌شوند و شامل موارد زیر هستند: ۱) کاهش لگاریتمی عوامل بیماری‌زا، ۲) کاهش غلظت اجزای آلی کوچک مانند TOC و COD، و ۳) استفاده از چندین تصفیه پیشرفته با عملکرد مشابه برای کنترل عوامل بیماری‌زا و اجزای شیمیایی. اطلاعات بیشتر در مورد الزامات کاهش لگاریتمی عوامل بیماری‌زا و حذف مواد شیمیایی در ادامه ارائه شده‌اند.

### ۲-۱- الزامات حذف لگاریتمی عوامل بیماری‌زا

در ایالات متحده، تولید آب برای مصارف خانگی زیر نظر قوانین مربوط به آب شرب- برای مثال لایحه آب پاک ایالات متحده[2] و لایحه آب شرب سالم ایالات متحده[3] -که توسط آژانس حفاظت محیط زیست ایالات متحده[4] تجویز شده است، کنترل می‌شود. استانداردهای کیفیت آب شرب و مقادیر عددی ارائه شده توسط قوانین ایالات متحده، با و یا بدون اعمال تغییرات در بسیاری از نقاط دنیا و احتمالاً در ایران، مورد استفاده قرار می‌گیرند. گرچه راهنماهای مربوط به استفاده مجدد از آب برای مصارف خانگی توسط آژانس حفاظت از محیط‌زیست ایالات متحده ارائه شده و چندین بار مورد بازبینی قرار گرفته‌اند، ولی در حال حاضر هیچ استاندارد ملی برای کیفیت آب بازیافتی در مورد این که مقدار کل کاهش لگاریتمی برای ارگانیسم‌های بیماری‌زا در پروژه‌های استفاده مجدد از آب برای مصارف خانگی چقدر باید باشد، ارائه نشده است (USEPA, 2017). مقررات فعلی کاهش لگاریتمی عوامل بیماری‌زا در کالیفرنیا سخت‌گیرترین مقررات در نوع خود هستند که عبارت اند از: کاهش ۱۲log برای ویروس‌های روده‌ای، ۱۰log برای حذف *کریپتوسپوریدیوم*[5]، و ۱۰log برای حذف *ژیاردیا*[6]. این مقررات بر اساس سه فرض استوار هستند: ۱) ریسک سالانه قابل قبول $10^{-4}$ نفر (۱ در ۱۰۰۰۰ نفر) در سال برای سرایت بیماری، ۲) غلظت قابل قبول میکروارگانیسم‌ها بر اساس پژوهش‌های در ارتباط با مقدار آن‌ها، و ۳) بدترین شرایط غلظت میکروارگانیسم‌ها در فاضلاب تصفیه نشده (Olivieri et al., 2016). پایه و اساس این مقادیر حذف لگاریتمی در جدول ۱ ارائه شده است. این معیارهای فرض شده با اطمینان بالا (بزرگ‌تر از آنچه که برای بسیاری از منابع رایج آب به‌دست می‌آید)، تولید آبی بدون میکروارگانیسم‌های بیماری‌زا را تضمین می‌کند و بنابراین آب تولید شده می‌تواند بدون هیچ خطری برای مصارف خانگی استفاده شود.

در حال حاضر، هیچ روش تصفیه‌ای وجود ندارد که به تنهایی قادر به حذف تمام عوامل بیماری‌زا تا حد مقادیر ارائه شده در جدول ۱ برای ایالت کالیفرنیا باشد. از این رو، تنها راه دستیابی به حذف مقادیر لگاریتمی مورد نیاز برای عوامل بیماری‌زا، استفاده از فرایندهای متعدد تصفیه است که اغلب مجموعه آنها، بیش از نیاز واقعی تصفیه است. استفاده از چند فرایند تصفیه پی در پی با عملکرد مشابه برای از میان بردن یک و یا چند آلاینده خاص با عنوان «جلوگیری با چندین مانع مکرر» شناخته می‌شوند. توضیحات بیشتر درباره مفهوم جلوگیری با استفاده از فرایندهای متعدد در بخش ۲-۳ بیان می‌شود. لازم به‌ذکر است که تعیین حد با مقادیر دیگری برای حذف لگاریتمی عوامل بیماری‌زا توسط کمیسیون کیفیت محیط زیست تگزاس[7] و مؤسسه ملی تحقیقات آب[8] نیز ارائه شده است که در جدول ۲ به‌صورت خلاصه نشان داده شده‌اند (NWRI, 2013).

[1] Environmental Buffer for Potable Reuse
[2] Clean Water Act-US (CWA)
[3] Safe Drinking Water Act (SDWA)
[4] US. Environmental Protection Agency (USEPA)

[5] *Cryptosporidium*
[6] *Giardia*
[7] Texas Commission on Envronmental Quality (TCEQ)
[8] National Water Research Institute (NWRI)

**جدول ۱**- پایه و اساس مقادیر حذف لگاریتمی مورد استفاده توسط ایالت کالیفرنیا (برگرفته از Olivieri et al., 2016)

**Table1.** Basis for the log reduction values used by the State of California (Adapted from Olivieri et al., 2016)

| مورد | ویروس | *ژیاردیا* | *کریپتوسپوریدیوم* |
|---|---|---|---|
| حداکثر غلظت در فاضلاب تصفیه‌نشده | $10^{5}$ ویروس در لیتر | $10^{5}$ کیست در لیتر | $10^{4}$ کیست در لیتر |
| غلظت قابل تحمل در آب شرب برای آب آشامیدنی تصفیه شده[1] | $2/2\times10^{-7}$ ویروس در لیتر | $6/8\times10^{-6}$ کیست در لیتر | $7/1\times10^{-6}$ کیست در لیتر |
| نسبت غلظت قابل تحمل در آب شرب به حداکثرغلظت در فاضلاب | $2/2\times10^{-12}$ | $6/8\times10^{-11}$ | $1/7\times10^{-10}$ |
| مقدار حذف لگاریتمی مورد نیاز | ۱۲ | ۱۰ | ۱۰ |

**جدول ۲**- نمونه‌هایی از الزامات قانونی مراجع مختلف برای حذف لگاریتمی عوامل بیماری‌زا و عناصر شیمیایی آلی کمیاب در ارتباط با پروژه‌های استفاده مجدد از آب برای مصارف خانگی (برگرفته از Mosher et al., 2016., NWRI, 2013)

**Table 2.** Examples of regulatory requirements from different sources for the log removal of pathogenes and trace organic chemichal constituents related to potable reuse projects (Adapted from Mosher et al., 2016, NWRI, 2013)

| مرجع قانون‌گذاری | الزامات قانونی | |
|---|---|---|
| | الزامات حذف لگاریتمی برای عوامل بیماری‌زا | حد عناصر شیمیایی آلی کمیاب بر اساس غلظت TOC یا COD |
| کالیفرنیا | از فاضلاب خام تا آب نهایی، مقادیر حذف لگاریتمی ۱۲log برای ویروس‌ها، ۱۰log برای *کریپتوسپوریدیوم*، و ۱۰log برای *ژیاردیا* مورد نیاز است. با محدود کردن حداکثر اعتبار کاهش لگاریتمی هر مرحله تصفیه به ۶log، که به طرز قابل توجهی کمتر از کل کاهش لگاریتمی مورد نیاز است، و با ضروری دانستن اسمز معکوس[3] و اکسیداسیون پیشرفته، به طور غیر مستقیم به چند مانع مکرر نیاز | قوانین IPR[2] کالیفرنیا برای کاربردهای زیرزمینی (یعنی تزریق به آب زیرزمینی) برای استفاده کامل از آب تصفیه پیشرفته شده بدون اختلاط، نیازمند استفاده از RO و محدود کردن TOC به کمتر از ۰/۵ میلی‌گرم در لیتر است. |
| فلوریدا | فلوریدا الزامات حذف لگاریتمی عوامل بیماری‌زا را تعیین نکرده است، ولی به‌طور خاص اذعان می‌دارد که «... باید شامل فرایندهایی باشد که به‌عنوان چند مانع مکرر برای کنترل عوامل بیماری‌زا عمل کنند». | برای IPR حد TOC برابر ۳ میلی‌گرم در لیتر تعیین شده است و به طور خاص اذعان شده است که تصفیه «... باید شامل فرایندهایی باشد که به‌عنوان چند مانع مکرر برای کنترل ترکیبات آلی عمل کنند». |
| تگزاس | کمیسیون کیفیت محیط‌زیست تگزاس[4] پساب WWTP[5] را به‌عنوان نقطه شروع الزامات کاهش عوامل بیماری‌زا برای پروژه‌های DPR می‌داند (برخلاف کالیفرنیا که فاضلاب خام را نقطه شروع پروژه‌های IPR می‌داند). در نتیجه، برای تصفیه پیشرفته زنجیره‌ای استفاده شده DPR، TCEQ حداقل مقادیر کاهش لگاریتمی ۰/۸log برای ویروس‌ها، ۵/۵log برای کریپتوسپوریدیوم ، و ۶log برای ژیاردیا را تعیین کرده است. این مقادیر می‌توانند با توجه به غلظت‌های پساب WWTP در محل، توسط TCEQ افزایش داده شوند. | تگزاس برای پروژه‌های استفاده مجدد از آب برای مصارف خانگی محدودیت TOC تعیین نکرده است. |
| ویرجینیا | ویرجینیا برای پروژه‌های استفاده مجدد آب برای مصارف خانگی، حد حذف لگاریتمی عوامل بیماری‌زا را تعیین نکرده است. | الزامات قانونی ویرجینیا، که بر اساس تعریف الزامات قانونی برای پروژه‌های بلندمدت IPR در آژانس آب شهر آکوکوان[6] است، حد COD برابر ۱۰ میلی‌گرم در لیتر را اجبار می‌کند (معادل با حد تقریباً ۴ میلی‌گرم در لیتر از TOC). |
| سنگاپور | سنگاپور برای پروژه‌های استفاده مجدد از آب جهت مصارف خانگی، مقادیر حذف لگاریتمی عوامل بیماری‌زا ارائه نداده است. | حد TOC برای NEWater برابر ۰/۱ میلی‌گرم در لیتر تعیین شده است، که از طریق اصلاح آب سطحی برای IPR به کار گرفته می‌شود. |
| انستیتو ملی تحقیقات آب (NWRI) | تاسیسات پیشرفته تصفیه آب AWTF باید بتوانند برای ویروس‌های روده‌ای - ۱۲ log، برای *کریپتوسپوریدیوم* ۱۰ log و برای کل باکتری‌های کلیفرم ۹ log کاهش را تأمین کنند. | بررسی علمی NWRI فقط بر حذف لگاریتمی عوامل بیماری‌زا معطوف بود و از این رو حدی برای حذف عناصر شیمیایی آلی کمیاب تعیین نشد. |

[1] Tolerable Drinking Water Concentration (TDWC)
[2] Indirect Potable Reuse (IPR)
[3] Reverse Osmosis (RO)
[4] Texas Commission on Environmental Quality (TCEQ)
[5] Wastewater Treatment Plant (WWTP)
[6] Upper Occoquan Service Authority (UOSA)

dx.doi.org/10.22093/wwj.2018.101905.981


## ۲-۲- الزامات حذف عناصر شیمیایی آلی کمیاب

در ایالات متحده، سلسله مراتب زنجیره‌ای تصفیه‌ها در AWTF به نحوی انتخاب می‌شوند که با تمامی رهنمودهای سلامتی ارائه شده توسط آژانس حفاظت از محیط زیست ایالات متحده، برای از بین بردن مواد شیمیایی از جمله حدود پنج محصول جانبی گندزدایی (DBP) (شامل تری‌هالومتان‌ها، اسیدهای هالواستیک، NDMA[1]، برومات‌ها و کلرات‌ها) هماهنگ باشند. با انجام فرایندهای پیشرفته تصفیه، مواد شیمیایی موجود و حداکثر درجه آلودگی[2] باید به حد مجاز مقادیر زیر استاندارد برسند. در مواردی وجود مقادیر ناچیزی از مواد شیمیایی مدیریت نشده حتی در حد میکروگرم در لیتر یا نانوگرم در لیتر پایین‌تر از استاندارد سلامتی انسان است (Trussell et al., 2015). برای افزایش اعتماد عمومی و به‌عنوان یک راهکار پیشگیرانه در برابر مواد شیمیایی ناشناخته در فاضلاب تصفیه شده، منطقی است که آب بیشتر مورد تصفیه قرار گیرد تا مواد شیمیایی و سمی، با درجه اطمینان بیشتری حذف شوند. دو گروه دیگر مواد شیمیایی که هنگام بررسی کارایی عملکرد سلسله تصفیه‌های زنجیره‌ای پیشرفته باید مورد پایش قرار بگیرند شامل موارد زیر هستند: ۱) برخی مواد شیمیایی که از نقطه نظر سلامت عمومی توسط مقررات سلامتی کنترل نشده‌اند و ۲) ترکیباتی که برای ارزیابی حذف مواد شیمیایی آلی در انواع مختلف تصفیه استفاده می‌شوند.

حذف مواد آلی شیمیایی ردیاب[3] توسط تصفیه‌های زنجیره‌ای پیشرفته در پروژه‌های استفاده مجدد از آب برای مصارف خانگی معمولاً از طریق پارامترهای جایگزینی مانند TOC[4] و COD اندازه‌گیری می‌شوند. از این رو، وجود TrOCها و سایر ترکیبات شیمیایی در آب تولید شده از طریق AWTFها با تعیین مقادیر مقرر شده برای TOC یا COD بررسی می‌شوند. لازم به ذکر است که برای حذف و کنترل برخی مواد شیمیایی آلی خاص مانندSVOC[5]ها و VOCها نیاز به فرایندهای تصفیه‌ای اضافه از قبیل اکسیداسیون پیشرفته است. همچنین ضروری است که به صحت استفاده از پارامترهای جایگزین مانند TOC و COD برای کنترل و حذف TrOCها اشاره شود زیرا این جایگزین‌ها همیشه جوابگوی دقیقی برای میزان اثر سمی ایجاد شده توسط TrOCها نیستند و از این رو ایمنی آب تصفیه شده پیشرفته با درجه اطمینان بالا با این اندازه‌گیری‌ها محقق نمی‌شود.

همان‌طور که پیش‌تر در جدول ۲ اشاره شد، حد و حدود تعیین شده مقررات برای TOC از حد سختگیرانه ۰/۱ میلی‌گرم در لیتر در سنگاپور تا حد بالای ۴ میلی‌گرم در لیتر در ویرجینیا متغیر است. به علاوه، حدود ۱۰ و ۱۸ میلی‌گرم در لیتر COD برای تقویت آب سطحی به‌ترتیب در ویرجینیا و جورجیا مورد استفاده قرار گرفته است. محدودیت ۰/۵ میلی‌گرم در لیتر TOC در کالیفرنیا که برای پروژه‌های DPR در نظر گرفته می‌شود، کمتر از غلظت TOC در تقریباً تمام منابع آب شرب مشتق از تصفیه معمول آب‌های سطحی است. اگرچه دسترسی به این حد پایین از TOC برای آب تصفیه شده پیشرفته با استفاده از تصفیه RO امکان‌پذیر است، ولی این حد از محدودیت برای تضمین سلامت جامعه ضرورتی ندارد. در پژوهش تروسل در سال ۲۰۱۵ گزارش شده است که به جز برای برخی آلاینده‌های خاص که حذف آن‌ها بدون RO، AOP یا BAF[6] به سختی امکان‌پذیر است، بیشتر مواد شیمیایی آلی موجود در فاضلاب دارای غلظت‌هایی هستند که برای سلامت انسان خطری جدی ایجاد نمی‌کنند (Trussell et al., 2015). در حال حاضر پژوهشی توسط WRRF[7] به‌منظور ارائه روش‌ها و پیشنهادات بهتر برای جایگزینی TOC در قبال TrOC در حال اجراست تا از این طریق اطمینان بیشتری برای ایمنی آب تصفیه پیشرفته ایجاد شود. همچنین لازم به ذکر است که هدف از تدوین و دسترسی به ضوابط و مقررات عددی اشاره شده در مورد حذف مواد شیمیایی، جلوگیری دادن مجوز به پروژه‌های استفاده مجدد از آب برای مصارف خانگی نیست، بلکه برای تدوین راهنمایی در ارزیابی عملکرد تصفیه‌های زنجیره‌ای در یک تصفیه‌خانه پیشرفته آب است.

## ۲-۳- استفاده از چندین مانع مکرر برای کنترل عوامل بیماری‌زا و عناصر شیمیایی

مفهوم چندین مانع مکرر، که پایه و اساس برنامه آب شرب سالم است، شامل موانع هماهنگ‌شده فنی، عملیاتی و مدیریتی است که

[1] N-Nitrosodimethyl Amin (NDMA)
[2] Maximum Contaminant Level (MCL)
[3] Trace Organic Contaminant (TrOC)
[4] Total Organic Carbon (TOC)
[5] Semi Volatile Organic Compound (SVOC)
[6] Biological Active Filtration (BAF)
[7] Water Reuse Research Fondation (WRRF)

dx.doi.org/10.22093/wwj.2018.101905.981

به جلوگیری از آلودگی در منشأ آب کمک می‌کند، تصفیه را بهبود می‌بخشد و از ایمن بودن منبع آب برای مصرف‌کنندگان اطمینان حاصل می‌نماید. مفهوم چندین مانع مکرر همچنین برای اجرای برنامه استفاده مجدد برنامه‌ریزی شده از آب برای مصارف خانگی نیز ضروری است، تا از کیفیت آب به‌دست‌آمده اطمینان حاصل شود. در AWTFها، مفهوم چندین مانع مکرر با متصل کردن تعدادی فرایند تصفیه (موانع) که اغلب بیش از حد مورد نیاز هستند و با هدف دسترسی به اهداف تصفیه در مورد حذف عوامل بیماری‌زا و مواد شیمیایی، اعمال می‌شود.

مقادیر متداول حذف لگاریتمی اختصاص یافته برای فرایندهای واحد تصفیه که در AWTFها استفاده می‌شوند، در جدول ۳ گزارش شده‌اند. همان‌طور که در جدول ۳ نشان داده شده است، هیچ یک از فرایندها به تنهایی نمی‌تواند اهداف حذف لگاریتمی که در جدول ۲ مشخص شده‌اند را برآورده کند. هربار که موانع مستقل به‌صورت سری با یکدیگر ترکیب می‌شوند، محافظت قابل توجهی در ایمنی آب ایجاد می‌شود. از این رو، شکست یک مانع به شکست کل سیستم تصفیه منجر نمی‌شود. به علاوه، استفاده از چند مانع مکرر منجر به بالا بردن سطح قابلیت اطمینان سیستم تصفیه می‌شود. به کمک مقادیر عددی گزارش شده در جدول ۳، عملکرد زنجیره‌ای تصفیه پیشرفته آب برای حذف لگاریتمی عوامل بیماری‌زا ارزیابی شد که در بخش ۳-۴ بحث می‌شود.

**جدول ۳**- مقادیر کاهش لگاریتمی گزارش‌شده در ادبیات فنی برای فرایندهای تصفیه‌ای ذکر شده، مقادیر داخل پرانتز در کالیفرنیا برای تغذیه آب زیرزمینی مورد تأیید قرار گرفته‌اند (Brandhuber, 2016., Olivieri et al., 2016)

**Table 3.** Range of log reduction values for various unit treatment process reported in the literature. The values in parentheses are approved for groundwater augmentation projects in California (Brandhuber, 2016., Olivieri et al., 2016)

| فرایند | مقادیر حذف لگاریتمی عوامل بیماری‌زا | | | |
|---|---|---|---|---|
| | ویروس | *کریپتوسپوریدیوم* | *ژیاردیا* | کل کلیفرم |
| تصفیه ثانویه (لجن فعال) | ۰-۲ (۱/۹) | ۰-۲ (۱/۲) | ۰-۲ (۰/۸) | ۰ |
| نصفیه ثانویه (فیلتراسیون و گندزدایی) | (۵) | (۰) | (۰) | |
| بیوراکتور غشایی | ۰ | ۰-۴ | ۰-۴ | ۰-۳ |
| میکروفیلتراسیون[1] یا اولترافیلتراسیون[2] | (۰) | ۴ (۴) | ۴ (۴) | ۰-۳ |
| ازن ($O_3$) | ۴-۵ | ۳ | ۳ | ۳ |
| نانوفیلتراسیون[3] | ۰-۲ | ۰-۲ | ۰-۲ | ۲-۴ |
| اسمز معکوس | (۲) | (۲) | (۲) | ۲-۴ |
| گندزدایی با کلر آزاد بعد از RO | (۴) | (۰) | (۰) | ۰-۳ |
| گندزدایی با ماورای بنفش[4] | ۲-۴ | ۲-۴ | ۲-۴ | ۳-۵ |
| ماورای بنفش / پراکسید هیدروژن (دز UV بیشتر از ۹۰۰mJ/cm) | ۴-۶ (۶) | ۴-۶ (۶) | ۴-۶ (۶) | |
| اکسیداسیون پیشرفته (دز UV بیشتر از ۹۰۰mJ/cm) | ۴-۶ (۶) | ۴-۶ (۶) | ۴-۶ (۶) | |
| تغذیه آب زیر زمینی از طریق مخازن سطحی (۶ ماه زمان ماند) | (۶) | (۰) | (۰) | |
| تقویت آب سطحی (۶ ماه زمان ماند) | (۶) | (۱۰) | (۱۰) | |

[1] Microfiltration (MF)
[2] Ultrafiltration (UF)
[3] Nanofiltration (NF)
[4] Ultraviolet (UV)

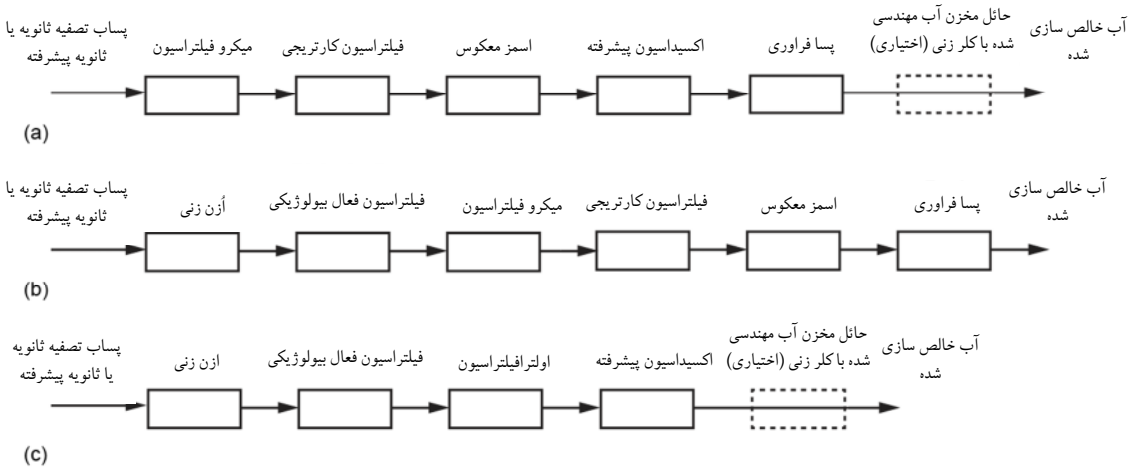



**Fig. 1.** Examples of three successfully implemented treatment trains used in AWTFs for producing ATW: (a) RO based without ozonation and with ESB; (b) RO based without ESB and with ozonation and BAF; and (c) Non-RO based with ozonation, BAF, and ESB. (Adapted from Tchobanoglous et al., 2015).

**شکل ۱**- مثال‌هایی از سه تصفیه پیشرفته زنجیره‌ای که در AWTFها برای تولید ATW با موفقیت مورد استفاده قرار گرفته‌اند: (a) بر اساس تصفیه RO بدون ازن زنی و با استفاده از ESB؛ (b) بر اساس تصفیه RO بدون استفاده از ESB، ازن زنی و BAF؛ و (c) بدون تصفیه RO، ازن زنی، BAF، و با استفاده از ESB (بر گرفته از Tchobanoglous et al., 2015)

## ۳- نمونه تصفیه زنجیره‌ای پیشرفته آب که در پروژه‌های استفاده مجدد از آب برای مصارف خانگی به‌کار گرفته شده‌اند

برای پروژه‌های استفاده مجدد از آب برای مصارف خانگی، چندین سلسله مراتب تصفیه زنجیره‌ای مورد استفاده قرار گرفته‌اند و یا پیشنهاد شده‌اند. مثال‌هایی از تصفیه زنجیره‌ای که در حال حاضر برای تولید ATW (برای مثال آب تصفیه‌شده از طریق تصفیه پیشرفته) در پروژه‌های استفاده مجدد از آب برای مصارف خانگی مورد استفاده قرار گرفتند، در شکل ۱ به نمایش درآمده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تصفیه زنجیره‌ای پیشرفته می‌تواند با استفاده از RO (شکل‌های ۱-a و ۱-b) و یا بدون استفاده از RO (شکل ۱-c) مورد استفاده قرار گیرد.

### ۳-۱- فرایندهای تصفیه زنجیره‌ای با استفاده از RO

فرایندهای تصفیه زنجیره‌ای آب بازیافتی که در شکل‌های ۱-a و ۱-b استفاده شده‌اند، از سیستم RO استفاده می‌کنند. به جز در مورد حائل آب ذخیره‌ای مهندسی‌شده[1] که استفاده از آن اختیاری است و کلرزدایی هم می‌شود، تصفیه زنجیره‌ای به نمایش درآمده در شکل ۱-a همان فرایند مورد استفاده در تأسیسات تصفیه پیشرفته آب حوزه آب اورنج کانتی[2] است که از طریق تغذیه آب زیرزمینی بهره‌برداری می‌شود (Kayhanian and Tchobanoglous, 2016).

در توسعه اخیر تأسیسات تصفیه پیشرفته آب OCWD، دو مخزن بزرگ متعادل کننده (هرکدام با ظرفیت ۲۸۳۹۰ مترمکعب)، قبل از فرایند میکروفیلتراسیون اضافه شده‌اند تا به عملکرد بلندمدت و پایدار تصفیه زنجیره‌ای بهبود بخشند. اهمیت متعادل‌سازی جریان ورودی آب بر عملکرد تصفیه، در بخش ۱-۲-۵ مورد بحث بیشتر قرار گرفته است.

تصفیه زنجیره‌ای آب بازیافتی نمایش داده شده در شکل ۱-b نوع اصلاح‌شده‌ای از تصفیه آب بازیافتی نشان داده شده در شکل ۱-a است که به آن ازن و فیلتراسیون فعال بیولوژیکی اضافه شده است تا موجب اکسیداسیون و تجزیه زیستی بیشتر مواد شیمیایی آلی، افزایش گندزدایی، و بهبود عملکرد MF شود. یکی دیگر از مزایای تصفیه اضافی اشاره شده، وابستگی کمتر به سایر فرایندهای تصفیه برای کاهش عوامل بیماری‌زا و کاهش بالقوه نیاز به ESB (با

[1] Engineered Storage Buffer (ESB)

[2] Orange County Water District (OCWD)

dx.doi.org/10.22093/wwj.2018.101905.981

استفاده و یا بدون استفاده از کلر آزاد) است. عملکرد نمونه‌ای از تصفیه زنجیره‌ای در مورد حذف عوامل بیماری‌زا و مواد آلی شیمیایی به‌ترتیب در بخش‌های ۳-۴ و ۳-۵ بحث شده‌اند.

## ۳-۲- فرایندهای تصفیه زنجیره‌ای بدون استفاده از RO

به‌دلیل هزینه و مسائل مطرح شده در ارتباط با برنامه‌ریزی و مدیریت پسماند تغلیظ‌شده RO، به‌ویژه در مناطقی که دسترسی به دریا و اقیانوس وجود ندارد، توجه خاصی به توسعه تصفیه زنجیره‌ای که قادر به حذف یا تبدیل مواد شیمیایی بدون جداسازی فیزیکی آن‌ها از آب نهایی است، شده است. در تصفیه زنجیره‌ای نمایش داده شده در شکل ۱-c، تصفیه RO حذف شده است، ولی در عوض ازن همراه با BAF، UF، AOP، و یا ESB همراه با کلرزدایی، که اختیاری است، مورد استفاده قرار گرفته است. برای مثال، سیستم DPR که در حال حاضر در شهر ویندهوک[1] در نامیبیا مورد استفاده قرار گرفته از تصفیه RO استفاده نمی‌کند (Kayhanian and Tchobanoglous, 2016).

اصلی‌ترین فرق بین تصفیه زنجیره‌ای مبتنی بر استفاده از RO، که در شکل‌های ۱-a و ۱-b نشان داده شده است و تصفیه زنجیره‌ای بدون استفاده از RO (شکل ۱-c)، میزان حذف TDS و TOC در آب تصفیه شده خروجی است. در بعضی موارد به‌دلیل کاهش سختی آب برای مصارف خانگی، به آن نمک اضافه می‌شود و در نتیجه این نمک اضافی به سیستم جمع‌آوری فاضلاب تخلیه می‌شود؛ به همین دلیل غلظت TDS در پساب خروجی این نوع تصفیه فاضلاب ثانویه اغلب ۲۰۰ تا ۴۰۰ میلی‌گرم در لیتر بیشتر از آب شرب اولیه برای مصارف خانگی است. در نتیجه، با توجه به غلظت TDS در منبع اصلی آب و درصد به‌کارگیری استفاده مجدد از آب برای مصارف خانگی، ممکن است از RO استفاده شود و یا همان‌طور که در شکل ۱-c نشان داده شده است، تصفیه دیگری مانند NF یا الکترودیالیز برای حذف و یا کاهش TDS اضافه شود.

## ۳-۳- نمونه حد مقادیر کیفیت آب تولید شده از تصفیه زنجیره‌ای پیشرفته

کیفیت آب ATW که از تصفیه زنجیره‌ای پیشرفته تولید می‌شود را می‌توان از طریق چند پارامتر از جمله پارامترهای زیر ارزیابی کرد:

[1] Windhoek

۱) حذف اجزای معمول در کیفیت آب، ۲) پتانسیل حذف عوامل بیماری‌زا، و ۳) حذف مواد ردیاب آلی و غیرآلی.

### ۳-۳-۱- حذف اجزای معمول در کیفیت آب

کیفیت آبی که از طریق تصفیه پیشرفته زنجیره‌ای (شکل ۱) به‌دست آمده در جدول ۴ گزارش شده است. همانطور که در جدول ۴ نشان داده شده است، کیفیت کلی آب تولید شده یکسان نیست و به نوع و چیدمان زنجیره فرایندهای مختلف تصفیه آب پیشرفته بستگی دارد. با مقایسه کیفیت آب از سه نوع متنوع تصفیه آب AWT، بیشترین تفاوت‌ها مربوط به مقادیر غلظت جامدات، مواد آلی، مواد مغذی، فلزها، و میکروارگانیسم‌هاست. لازم به ذکر است که داده‌های گزارش شده در جدول ۴ برای اهداف مقایسه‌ای ارائه شده‌اند و بیشتر کیفی هستند تا کمّی و باید با احتیاط مورد استفاده قرار گیرند.

### ۳-۳-۲- نمونه حد مقادیر حذف لگاریتمی پاتوژن‌ها برای تصفیه زنجیره‌ای پیشرفته

مقادیر در حد انتظار حذف لگاریتمی عوامل بیماری‌زا برای هرکدام از سه مثال تصفیه زنجیره‌ای پیشرفته که در شکل ۱ نشان داده شده‌اند، برگرفته از داده‌های ارائه شده در جدول ۳، به‌ترتیب در جدول‌های ۵، ۶ و ۷ ارائه شده‌اند. مقادیر ذکر شده برای حذف لگاریتمی در این جداول، کاهش مقدار عوامل بیماری‌زا برای تصفیه‌خانه فاضلاب بالادست یا برای تأسیسات تصفیه آب آشامیدنی پایین‌دست که با آب آشامیدنی تصفیه شده در بالادست مخلوط می‌شود را شامل نمی‌شود.

همانطور که در جداول ۵، ۶ و ۷ گزارش شده است، هر سه نوع تصفیه زنجیره‌ای ارائه شده در شکل ۱، حذف قابل توجهی از عوامل بیماری‌زا ارائه می‌کنند و مطابق ضوابط حذف لگاریتمی تدوین‌شده در کالیفرنیا و تگزاس است. تصفیه زنجیره‌ای نشان داده شده در شکل‌های ۱-a و ۱-b به نسبت تصفیه زنجیره‌ای شکل ۱-c مقدار حذف بیشتری برای *کریپتوسپوریدیوم* حاصل می‌کنند (۱۲log در مقابل ۱۰log)، ولی تصفیه زنجیره‌ای نمایش داده شده در شکل ۱-c به نسبت تصفیه زنجیره‌ای شکل‌های ۱-a و ۱-b حذف بیشتری برای ویروس‌ها مهیا می‌کند (۱۶log در مقابل ۱۲log). حذف ویروس برای تصفیه زنجیره‌ای شکل ۱-b با اضافه کردن گندزدایی با کلر آزاد (بدون ESB)، که عموماً با هزینه کم صورت می‌گیرد،

**جدول ۴**- کیفیت پساب نمونه بعد از گذشت مراحل مختلف تصفیه پیشرفته (برگرفته از Tchobanoglous et al., 2016)

**Table 4.** Typical range of effluent water quality after various levels of advanced water treatment (Adapted from Tchobanoglous et al., 2016)

| پارامترهای کیفی آب | واحد | کیفیت فاضلاب خام و پساب بعد از تصفیه اشاره‌شده | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | فاضلاب خام | لجن فعال معمولی با فیلتراسیون | زنجیره تصفیه شکل ۱-c | زنجیره تصفیه شکل ۱-b | زنجیره تصفیه شکل ۱-a |
| TSS | mg/L | ۱۰۰-۳۸۹ | ۲-۸ | ۱-۲ | ≤۱ | ≤۱ |
| کدورت | NTU | ۸۰-۱۵۰ | ۱-۱۰ | ≤۱ | ≤۰/۱ | ≤۰/۱ |
| BOD | mg/L | ۱۳۳-۴۰۰ | <۵- | ≤۱ | ≤۱ | ≤۱ |
| COD | mg/L | ۳۳۹-۱۰۱۶ | ۳۰-۷۰ | ≤۱۰-۳۰ | ≤۲-۳۰ | ≤۲-۳۰ |
| TOC | mg/L | ۱۰۹-۳۲۸ | ۱۵-۳۰ | ۲-۵ | ۰/۱-۱ | ۰/۱-۱ |
| $NH_3$-N | mg N/L | ۱۴-۴۱ | ۱-۶ | ≤۱ | ≤۱ | ≤۱ |
| $NO_3$-N | mg N/L | 0-trace | ۵-۳۰ | ۰/۰۰۱ | ≤۱ | ≤۱ |
| $NO_2$-N | mg N/L | 0-trace | 0-trace | ≤۰/۰۰۱ | ≤۰/۰۰۱ | ≤۰/۰۰۱ |
| نیتروژن کل[1] | mg N/L | ۲۳-۶۹ | ۸۰۰۱۵-۳۵ | ≤1 | ≤1 | ≤1 |
| فسفر کل[2] | mg P/L | ۳/۷-۱۱ | <MRL۲-۶ | ۲-۶ | ≤۰/۵ | ≤۰/۵ |
| VOCs | µg/L | <۱۰۰->۴۰۰ | ۱۰-۴۰ | ≤۱ | ≤۱ | ≤۱ |
| Fe و Mn | mg/L | ۱-۲/۵ | ۱-۱/۴ | ≤۰/۳ | ≤0.1 | ≤0.1 |
| سور فاکتانت‌ها | mg/L | ۴-۱۰ | ۰/۵-۱/۵ | ≤۰/۵ | ≤۰/۱ | ≤۰/۱ |
| TDS | mg/L | ۳۷۴-۱۱۲۱ | ۳۷۴-۱۱۲۱ | ۳۷۴-۱۱۲۱ | ≤۵-۴۰ | ≤۵-۴۰ |
| مواد شیمیایی خانگی[a] | µg/L | ۱۰-۵۰ | ۵-۳۰ | ≤۰/۱ | ≤۰/۱ | ≤۰/۱ |
| کل کلیفرم | No./100 mL | $۱۰^{۶}$-$۱۰^{۱۰}$ | $۱۰^{۳}$-$۱۰^{۵}$ | ۳۵۰ | <۱ | <۱ |
| کیست‌های تک‌یاخته | No./100 mL | $۱۰^{۱}$-$۱۰^{۳}$ | ۰-۱۰ | ≤۰/۰۰۲ | ≤۰/۰۰۲ | ≤۰/۰۰۲ |
| ویروس‌ها | PFU/100 mL | $۱۰^{۱}$-$۱۰^{۸}$ | $۱۰^{۱}$-$۱۰^{۴}$ | ≤۰/۰۳ | ≤۰/۰۳ | ≤۰/۰۳ |

[a] مواد شیمیایی خانگی شامل مواد ضد حریق، محصولات بهداشتی، ومواد شیمیایی دارویی و غیر دارویی می‌شود.

**جدول ۵**- کاهش لگاریتمی عوامل بیماری‌زا توسط تصفیه زنجیره‌ای نمایش داده شده در شکل ۱-a (برگرفته از Mosher et al., 2016)

**Table 5.** Pathogen log reduction credits achieved by treatment trains shown in Fig. 1a (Adapted from Mosher et al., 2016)

| عامل بیماری‌زا | کاهش لگاریتمی بر اساس استفاده از تکنولوژی تصفیه بکار گرفته شده | | | | کل کاهش لگاریتمی |
|---|---|---|---|---|---|
| | MF[a] | RO[b] | UV/AOP[c] | ESB به همراه $Cl_2$[d,e] | |
| ویروس | ۰ | ۲ | ۶ | ۴ | ۱۲ |
| *کریپتوسپوریدیوم* | ۴ | ۲ | ۶ | ۰ | ۱۲ |
| کل کلیفرم[f] | ۳ | ۲ | ۶ | ۴ | ۱۵ |

a: کاهش چهار لگاریتمی *کریپتوسپوریدیوم* که بر اساس آزمایش‌های روزانه غشاها توسط سازمان‌های مدیریت تصفیه آب ارائه شده است، با فرض وجود فرایند میکروفیلتراسیون است.

b: کاهش دو لگاریتمی برای ویروس‌های، *کریپتوسپوریدیوم* و *ژیاردیا* برای فرایند اسمز معکوس فرض شده است.

c: کاهش شش لگاریتمی برای ویروس‌ها و *کریپتوسپوریدیوم* برای فرایندهای ماورای بنفش / اکسیداسیون پیشرفته (UV/AOP) فرض شده است.

d: بر اساس قانون تصفیه آب‌های سطحی آژانس حفاظت محیط زیست ایالات متحده، کلر آزاد در زمان تماس برابر حداقل ۶ میلی‌گرم در لیتر در ۱۰ درجه سلسیوس کاهش چهار لگاریتمی ویروس‌ها را فراهم می‌کند.

e: در صورتی که از زمان تماس بیشتری استفاده شود، احتمالاً کلر و ازن باعث کاهش‌های لگاریتمی بیشتری نسبت به مقادیر نشان داده شده، می‌شوند.

f: مقادیر واقعی نشان داده شده (Gerringer et al., 2015).

[1] Total Nitrogen (TN)
[2] Total Phosporous (TP)

**جدول ۶**- کاهش لگاریتمی عوامل بیماری‌زا توسط تصفیه زنجیره‌های نمایش داده شده در شکل b-1 (برگرفته از Mosher et al., 2016)

**Table 6.** Pathogen log reduction credits achieved by treatment trains shown in Fig. 1-b (Adapted from Mosher et al., 2016)

| عامل بیماری‌زا | کاهش لگاریتمی بر اساس استفاده از تکنولوژی تصفیه بکار گرفته شده | | | | | کل کاهش لگاریتمی |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | $O_3$[a] | BAF | MF | RO | UV/AOP | |
| ویروس | ۴ | ۰ | ۰ | ۲ | ۶ | ۱۲ |
| *کریپتوسپوریدیوم* | ۰ | ۰ | ۴ | ۲ | ۶ | ۱۲ |
| کل کلیفرم[b] | ۲-۴ | ۰ | ۳ | ۲ | ۶ | >۱۳ |

a بر اساس قانون تصفیه آب‌های سطحی آژانس حفاظت محیط‌زیست ایالات متحده، ازن در زمان تماس و با غلظت حداقل ۱ میلی‌گرم در لیتر در ۱۰ درجه سلسیوس باعث کاهش چهار لگاریتمی ویروس‌ها می‌شود.

b مقادیر واقعی نشان داده شده (Gerringer et al., 2015)

**جدول ۷**- کاهش لگاریتمی عوامل بیماری‌زا توسط زنجیره‌های تصفیه نمایش داده شده در شکل c-۱ (برگرفته از Mosher et al., 2016)

**Table 7.** Pathogen log reduction credits achieved by treatment trains shown in Fig. 1c (Adapted from Mosher et al., 2016)

| عامل بیماری‌زا | کاهش لگاریتمی بر اساس استفاده از تکنولوژی تصفیه به‌کار گرفته شده | | | | | کل کاهش لگاریتمی |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | $O_3$[a,b] | BAF | UF[c] | UV/AOP[d] | ESB with $Cl_2$[e] | |
| ویروس | ۴ | ۰ | ۲ | ۶ | ۴ | ۱۶ |
| *کریپتوسپوریدیوم* | ۰ | ۰ | ۴ | ۶ | ۰ | ۱۰ |
| کل کلیفرم[1] | ۲-۴ | ۰ | ۳ | ۶ | ۴ | >۱۵ |

a بر اساس قانون تصفیه آب‌های سطحی آژانس حفاظت محیط زیست ایالات متحده، ازن در زمان تماس حداقل با غلظت ۱ میلی‌گرم در لیتر در ۱۰ درجه سلسیوس باعث کاهش چهار لگاریتمی ویروس‌ها می‌شود.

b در صورتی که از زمان تماس‌ها بالاتر استفاده شود، احتمالاً کلر و ازن به نسبت مقادیر نشان داده شده، باعث کاهش‌های لگاریتمی بیشتری می‌شوند.

c کاهش دو لگاریتمی ویروس‌ها بر اساس آزمایش‌های MS-2 انجام‌شده بر روی باکتری‌ها به‌وسیله تولیدکنندگان ماژول‌های اولترافیلتراسیون (UF) تحت تأیید تکنولوژی محیط‌زیستی بنیاد ملی علوم (NSF)، و ماده ۲۲ برنامه‌های صدور گواهینامه فرض شده است.

d کاهش دو لگاریتمی ویروس‌ها و *کریپتوسپوریدیوم* بر اساس آزمایش‌های صورت گرفته توسط تولیدکنندگان UV برای فرایند UV/AOP فرض شده است.

e بر اساس قانون تصفیه آب‌های سطحی آژانس حفاظت محیط زیست ایالات متحده، کلر آزاد در زمان تماس حداقل با غلظت ۶ میلی‌گرم در لیتر در ۱۰ درجه سلسیوس باعث کاهش چهار لگاریتمی ویروس‌ها می‌شود.

f مقادیر واقعی نشان داده شده (Gerringer et al., 2015).

می‌تواند تا ۱۶log افزایش یابد. اگر از زمان تماس بیشتر استفاده شود، هم کلر و ازن در همه شرایط باعث حذف مقدار لگاریتمی بیشتری به نسبت مقادیر نشان داده شده در جداول ۵ و ۷ می‌شوند.

## ۳-۵- نمونه حد مقادیر اجزای شیمیایی ردیاب برای تصفیه زنجیره‌ای پیشرفته

غلظت اجزای شیمیایی ردیاب تصفیه‌شده توسط هرکدام از فرایندهای تصفیه زنجیره‌ای پیشرفته، در جدول ۸ درج شده است. همان‌طور که نشان داده شده است، هیچ فرایند تصفیه‌ای به تنهایی همه آلاینده‌های شیمیایی را حذف نمی‌کند، بنابراین استفاده از چندین تصفیه پیشرفته به‌صورت زنجیره‌ای ضروری است. تولید آلاینده‌ها با ترکیب‌های قطبی کوچک توسط RO (مانند NDMA[1]) کم است (Plumlee et al., 2008). در مورد ترکیبات آب‌دوست غیر یونی با وزن مولکولی کم، شامل کلروفرم‌های DBP و بروموفرم‌ها، نیز چنین است (Drewes, 2002). ترکیبات شیمیایی دیگر، مانند مواد ضد حریق و برای مثال (TCEP[2])، در مقابل تصفیه اکسیداسیون پیشرفته مقاوم هستند (Plumlee et al., 2008).

بنابراین، حذف تمامی مواد شیمیایی که تحت پوشش ضوابط و مقررات قرار گرفته یا قرار نگرفته‌اند و همچنین حذف عوامل

[1] N-Nitrosodimethylamine
[2] Tris(2-carboxyethyl)phosphine

بیماری‌زا، مستلزم استفاده از موانع مکرر با انجام چندین تصفیه زنجیره‌ای پیشرفته است (شکل ۱).

همانطور که مشاهده می‌شود هر سه تصفیه برای استفاده مجدد از آب به‌منظور مصارف خانگی که در شکل ۱ نشان داده شده‌اند، برای حذف TrOCها و سایر آلاینده‌های شیمیایی به تعداد کافی مانع ایجاد می‌کنند (دو مانع یا بیشتر). برای مثال، تصفیه زنجیره‌ای مبتنی بر ROکه در شکل‌های a-۱ و b-۱ نشان داده شده‌اند، می‌توانند با اطمینان بالا الزامات فعلی کالیفرنیا در مورد استفاده مجدد از آب برای مصارف خانگی را برآورده کنند؛ همان‌طور که با توجه به کاربرد و کارایی بالای آن در کاهش TrOCها، در سیستم تغذیه آب زیرزمینی اورنج کانتی کالیفرنیا برای آب آشامیدنی سال‌های زیادی مورد استفاده قرار گرفته است.

در بیشتر موارد، تصفیه زنجیره‌ای نشان داده شده در شکل c-۱ نمی‌تواند با قابلیت اطمینان بالا، حد مقادیر تعیین شده TOC در کالیفرنیا (۰/۵ میلی‌گرم در لیتر) را برآورده کند؛ گرچه، لزوم رسیدن به این حد پایین از مقادیر در مقررات مورد سؤال است و در حال حاضر تحت بررسی بیشتر است. البته، برای عملکرد بهتر، می‌توان تصفیه زنجیره‌ای پیشرفته نشان داده شده در شکل c-۱ را به آسانی اصلاح کرد. برای مثال طراحی فیلتراسیون دوگانه، موجب بهبود آلاینده‌های شیمیایی می‌شود و راندمان عملکرد GAC در پایین‌دست فرایند فیلتراسیون بیولوژیکی را افزایش می‌دهد (Schimmoller, 2016).

**جدول ۸**- غلظت ترکیبات شیمیایی کمیاب منتخب در پساب تصفیه‌شده با استفاده از فرایندهای متفاوت متداول و فرایندهای تصفیه پیشرفته در مقایسه با شاخص‌های تعیین شده برای هر ترکیب شیمیایی (برگرفته از Tchobanoglous et al., 2016)

**Table 8.** Concentration of elective trace constituent of effluent treated by different conventional and advanced treatment processes compared with their treatment criteria (Adapted from Tchobanoglous et al., 2016)

| ترکیبات شیمیایی | غلظت (میلی‌گرم در لیتر) | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | شاخص تعیین شده | MRL | پساب ثانویه | تکنولوژی تصفیه پیشرفته | | | | | | |
| | | | | پساب $O_3$ | پساب BAF | پساب UV | فیلترشده MF | رد شده از RO | پساب $UV/H_2O_2$ |
| الکل | ۴۰۰ | ۳۱ | ۲۹۲ | <MRL[1] | <MRL | <MRL | NT[2] | <MRL | <MRL |
| کاربامازپین[3] | ۱۰،۰۰۰ | ۱ | ۱۹۴ | <MRL | ۲۵ | ۱ | T | <MRL | <MRL |
| DEET[4] | ۲۰۰،۰۰۰ | ۶ | ۴۵ | <MRL | <MRL | <MRL | NT | <MRL | <MRL |
| استرون[5] | ۳۲۰ | ۱ | <MRL | <MRL | <MRL | <MRL | NT | <MRL | <MRL |
| مپروبامات[6] | ۲۰۰،۰۰۰ | ۳ | ۳۸۰ | ۱۵۸ | ۱۷۸ | ۱۷۰ | NT | <MRL | <MRL |
| PFOA[7] | ۴۰۰ | ۹ | ۱۲ | ۱۰ | ۳۵ | ۲۲ | NT | <MRL | <MRL |
| PFOS[8] | ۲۰۰ | ۸ | <MRL | <MRL | <MRL | <MRL | NT | <MRL | <MRL |
| پیریمیدون[9] | ۱۰،۰۰۰ | ۷ | ۴،۱۰۰ | ۵۲۵ | ۲۳ | ۱۸۶ | NT | ۷ | ۷۵ |
| سوکلراموز[10] | ۱۵۰،۰۰۰،۰۰۰ | ۷۷ | ۲۴،۸۰۰ | ۱۷،۲۰۰ | ۱۹،۷۰۰ | ۲۱،۷۰۰ | NT | <MRL | <MRL |
| TCEP[11] | ۵،۰۰۰ | ۷۷ | <MRL | <MRL | <MRL | <MRL | NT | <MRL | <MRL |
| تری کلوسان[12] | ۲،۱۰۰،۰۰۰ | ۸ | ۱۲۸ | <MRL | <MRL | ۹ | NT | <MRL | <MRL |

[1] Method Reporting Limit
[2] Not Tested
[3] Carbamazepine
[4] N,N-diethyl-meta-toluamide or diethyltoluamide
[5] Estrone
[6] Meprobamate
[7] Perfluorooctanic Acid
[8] Perfluorooctane Sulfonate
[9] Primidone
[10] Sucralose
[11] Tris (2-Carboxyethyl) Phosphine) Hypochloride
[12] Triclosan

dx.doi.org/10.22093/wwj.2018.101905.981

## ۴- اهمیت کنترل آلاینده‌های منبع تولید در استفاده مجدد از آب برای مصارف خانگی

منبع اصلی آب بازیافتی در یک پروژه استفاده مجدد از آب، به‌طور کلی از جوامع شهری به‌دست می‌آید. منابع اصلی فاضلاب تولید شده در یک جامعه شهری، تأسیسات مسکونی و تجاری، آموزشی و عمومی هستند. به‌علاوه، با توجه به ویژگی‌های هر جامعه، ممکن است حجم قابل توجهی فاضلاب توسط مجموعه‌های صنعتی تولید شود. مواد آلی و غیرآلی موجود در فاضلاب و همچنین وجود آلاینده‌های دیگر در منابع آب به‌طور قابل توجهی تغییر ایجاد می‌کند. کنترل، محدود کردن، یا حذف آلاینده خاص و جلوگیری از ورود آن‌ها به فاضلاب که روند تصفیه را دشوار می‌سازد و کیفیت نهایی فاضلاب تصفیه شده برای استفاده مجدد از آب برای مصارف خانگی را مختل می‌کند، معمولاً از طریق کنترل آلاینده‌ها در منبع انجام می‌شود. عناوینی که در این بخش از مقاله مورد بحث قرار می‌گیرند شامل موارد زیر هستند: ۱) مزایای کنترل آلاینده‌ها در مبدأ در پروژه استفاده مجدد از آب برای مصارف خانگی، ۲) اجزای اصلی برنامه کنترل آلاینده‌ها از مبدأ، ۳) انتظارات منطبق با واقعیت از برنامه کنترل آلاینده‌ها از مبدأ ۴) تدوین برنامه کنترل آلاینده‌ها از مبدأ در ایران.

### ۴-۱- مزایای داشتن برنامه کنترل آلاینده‌ها از مبدأ تولید در استفاده مجدد از آب برای مصارف خانگی

کنترل آلاینده‌ها از مبدأ تولید معمولاً قبل از رهاسازی آلاینده‌های خاص به سیستم جمع‌آوری فاضلاب و پیش از رسیدن به تصفیه‌خانه‌های ثانویه فاضلاب انجام می‌شود. به دور نگاه داشتن ترکیبات شیمیایی مورد نظر (COC[1]ها) از سیستم فاضلاب از طریق یک برنامه قوی کنترل آلاینده‌ها از مبدأ تولید می‌تواند بسیار سودمند، کارآمد و روشی مقرون به صرفه برای مدیریت و تصفیه فاضلاب به‌منظور استفاده مجدد باشد. مزایای اصلی یک برنامه کارآمد کنترل آلاینده‌ها از مبدأ تولید شامل موارد زیر است:

- کمینه کردن رهاسازی ترکیبات شیمیایی مضر یا ترکیباتی که تصفیه آن‌ها دشوار است به سیستم جمع‌آوری فاضلاب منازل، کسب و کارهای تجاری و حتی صنایع و تأسیسات بهداشت و درمان.
- بهبود بخشیدن کیفیت پسماند فاضلاب و عملکرد تصفیه آب.
- اطمینان دادن به جامعه از این که سیستم جمع‌آوری فاضلاب برای استفاده مجدد از آب برای مصارف خانگی تحت کنترل آلاینده‌ها از مبدأ تولید مدیریت می‌شود.

### ۴-۲- اجزای اصلی برنامه کنترل آلاینده‌ها از مبدأ تولید

یک برنامه کارآمد کنترل آلاینده‌ها از مبدأ تولید معمولاً شامل چندین رویکرد است که شامل موارد زیر می‌شوند: ۱) مسئولیت در قبال مقررات قانونی، ۲) پایش و ارزیابی سیستم جمع‌آوری فاضلاب در ناحیه خدمت، ۳) بررسی منابع ترکیبات شیمیایی و سایر ترکیبات، ۴) نگهداری موجودی اجزای شیمیایی، ۵) آماده‌سازی برنامه‌های ارتباط عمومی و مشارکتی، و ۶) آماده‌سازی برنامه پاسخ برای انحرافات کیفیت آب. شرح این عناصر به‌طور خلاصه در جدول ۹ مورد بررسی قرار گرفته‌اند. انتظارات از یک برنامه کنترل آلاینده از مبدأ تولید و چند مثال از پروژه‌های کنترل مبدأ در زیر مورد بحث قرار گرفته‌اند.

### ۴-۳- انتظارات مطابق با واقعیت از یک برنامه کنترل آلاینده‌ها از مبدأ تولید

اکثر برنامه‌های کنترل آلاینده‌ها از مبدأ تولید طوری طراحی نشده‌اند که تمام مواد شیمیایی ناخواسته را حذف کنند و از این رو انتظارات از آن‌ها باید با توجه به کارایی آن‌ها مطابق با واقعیت باشد. مهم‌ترین انتظار از یک برنامه کنترل آلاینده‌ها از مبدأ تولید باید بر اساس کاهش ترکیبات شیمیایی مشکل‌زا باشد. عموماً برنامه کنترل آلاینده‌ها از مبدأ زمانی موفقیت‌آمیز خواهد بود که: ۱) ترکیبات شیمیایی مورد نظر به‌طور پیوسته و در حد مقادیر قابل اندازه‌گیری در پساب فاضلاب یا سیستم جمع‌آوری فاضلاب شناسایی شود، و ۲) تامین آب از یک منبع یا از یک گروه منابع مشابه باشد که سابقه خوبی در زمینه بارگذاری پساب داشته باشند.

### ۴-۴- تدوین برنامه کنترل آلاینده ها از مبدأ تولید در ایران

در تدوین یک برنامه کارآمد کنترل آلاینده‌ها از مبدأ تولید در ایران، شناخت منابع ترکیبات شیمیایی وارد شونده به سیستم جمع‌آوری از منابع نقطه‌ای مدیریت‌شده، ضروری است. برای کمینه

[1] Constituents of Concern (COC)

**جدول ۹**- تعریف عناصر اصلی مربوط به بهبود بخشیدن برنامه کنترل آلاینده‌ها از مبدأ تولید در پروژه‌های استفاده مجدد از آب برای مصارف خانگی (برگرفته از Tchobanoglous et al., 2015)

**Table 9.** Description of major elements for an enhanced source control program in a potable reuse program (Adapted from Tchobanoglous et al., 2015)

| عنصر | تعریف |
|---|---|
| **اجازه قانون‌گذار** | |
| اجازه قانونی | حصول اطمینان از این که مجوز لازم برای کنترل آلاینده‌ها از مبدأ، شامل اجازه نظارت یا بازرسی و برنامه‌ریزی و بررسی اتصالات جدید به سیستم جمع‌آوری، وجود داشته باشد. |
| مجوز رهاسازی | حصول اطمینان از این که در مجوز رهاسازی فاضلاب صنعتی و نیز سایر مکانیسم‌های کنترلی، رهاسازی COC به درستی کنترل شود و مقدار آن کاهش یابد. |
| اجرای قانون | حصول اطمینان از این که برنامه اجرای قانون بتواند به سرعت COCها را شناسایی کرده و به آن‌ها پاسخ دهد. |
| برنامه‌های کنترلی جایگزین | در نظر گرفتن مکانیسم‌های کنترلی جایگزین، مانند BMP[1]ها یا اعطای مجوز به خود به‌دلیل عدم رهاسازی مواد آلاینده برای گروه‌هایی از کسب و کارهای صنعتی و تجاری. |
| **پایش و ارزیابی سیستم جمع‌آوری فاضلاب در ناحیه خدمت (حوضه آبریز فاضلاب)** | |
| برنامه‌های پایش عادی | جریان ورودی به WWTP و پساب ثانویه ، ثانویه پیشرفته ، و یا پیشرفته برای کنترل آلاینده‌ها به ویژه COCهایی که ممکن است از سیستم جمع‌آوری وارد شود، پایش می‌شوند. |
| برنامه اولویت‌بندی اجزا | COCها شناسایی شده و منتخب آن‌ها با استفاده از نتایج برنامه‌های پایش عادی، انتخاب می‌شود. ممکن است نیاز باشد برای برخی از آن‌ها که اهمیت بیشتری دارند، برنامه‌های پایش جداگانه در نظر گرفته شود. |
| ارزیابی حد و مرزهای فنی محلی | اجزای کنترل‌شده و دیگر COCها از نظر پتانسیل ایجاد تداخل، عبور از AWTF، یا اثرگذاری بر سلامت انسان و ایمنی محیط زیست مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. برای تعیین حدود محلی، طیف وسیع‌تر و جامع‌تری از COCها مانند ۱) اجزای کنترل‌شده و کنترل‌نشده مربوط به استفاده مجدد از آب برای مصارف خانگی (مثلاً آلاینده‌های آب شرب) یا ۲) CES[2]ها در نظر گرفته شود. |
| **بررسی مبدأ** | |
| موجودی کسب و کارهای صنعتی و تجاری | در مورد مراکز بزرگ ممکن است لازم باشد برای شناخت کافی از اجتماعات مختلف یا جریان‌های صنعتی که از سایر منابع فاضلابی سرچشمه می‌گیرند، با ابزار نقشه‌برداری شبکه سیستم اطلاعات جغرافیایی[3] (GIS) اطلاعات مورد نظر استخراج شود. |
| برنامه پاسخ مشترک WWTP-AWTF | برنامه پاسخ شامل یک فلوچارت است که مسئولیت‌های اصلی و نکات تصمیم‌گیری برای بررسی یا رفع COCهای وارد شده به سیستم جمع‌آوری را نشان می‌دهد. |
| **نگهداری موجودی فعلی مواد شیمیایی و اجزای آب** | |
| برنامه موجودی مواد شیمیایی | یک پایگاه داده از مواد شیمیایی ذخیره شده و احجام سالانه آنها که مورد استفاده تولیدکنندگان صنعتی و تجاری ناحیه خدمت قرار می‌گیرند، تدوین و نگهداری شود. منابع بالقوه این نوع داده‌ها شامل خود صنایع و آتش‌نشانی‌های محلی می‌شوند. |
| برنامه کنترل حمل و نقل آب | برای پایش و ردیابی پسماندهای عفونی رها شده یا فاضلاب‌هایی که توسط کامیون به سیستم جمع‌آوری منتقل می‌شوند، به یک برنامه نیاز است. حمل کنندگان باید قبل از کسب اجازه برای رهاسازی، موجودی مواد شیمیایی و اطلاعات مربوط به رهاسازی را به مسئولان تصفیه فاضلاب ارائه نمایند و اقدامات لازم صورت گیرد که در صورت نیاز، حمل و نقل کنندگان محموله خود را به تأسیسات تصفیه دیگری منتقل کنند. |
| جدول حقایق مواد شیمیایی | پایگاه داده‌ای از جداول واقعیت CECهایی که در حوضه خدمت به آن‌ها برخورد شده است، نگهداری شود. |

[1] Best Management Practices (BMP)
[2] Constituent of Emerging Concern (CEC)
[3] Geographic Indormation System (GIS)

dx.doi.org/10.22093/wwj.2018.101905.981

ادامه جدول ۹

| عنصر | تعریف |
|---|---|
| **برنامه ارتباط عمومی** | |
| رهاسازی‌های صنعتی | اطلاع‌رسانی در موارد زیر انجام شود: ۱) در مورد استفاده مجدد از آب برای مصارف خانگی به صنایع ۲) در مورد روش‌های کنترل آلاینده‌ها از مبدأ، و ۳) در مورد مساعدت در تطبیق با قوانین و صدور مجوزهای ضروری با هدف حمایت از برنامه استفاده مجدد از آب برای مصارف خانگی.<br>برای تشویق به برنامه رهاسازی‌های تجاری و صنعتی به گونه‌ای تدوین شود که موجب تشویق به همکاری برای حفاظت از حوضه آبریز فاضلاب در بین مراکز تجاری و صنعتی باشد، مثلاً برنامه‌های همکاری در نگهداری از محیط زیست یا برنامه‌های تشویقی برای رعایت پیوسته قوانین.<br>به صنایع و کسب و کارهایی که از مواد شیمیایی شامل COCها استفاده می‌کنند، کمک شود تا گزینه‌های کنترل از مبدأ مانند جایگزینی مواد شیمیایی را شناسایی کنند. |
| برنامه مشارکت در پیشگیری از آلوده شدن محل | در ناحیه خدمت WWTP، برنامه‌ای مشارکتی بین شهرها، نواحی و حوضه‌های استحفاظی برای انتقال اطلاعات به مردم در مورد COCها و رهاسازی‌های قابل قبول به سیستم فاضلاب تدوین شود. |
| برنامه ارتباط و آموزش عمومی | یک برنامه ارتباط عمومی در مورد دفع صحیح مواد دارویی و محصولات خانگی شامل مواد شیمیایی که تصفیه آن‌ها دشوار است، تهیه شود (مثلاً این که چه موادی در چاه فاضلاب انداخته شوند و چه موادی نه). تدوین برنامه جمع‌آوری پسماندهای خطرناک از منازل مورد توجه قرار گیرد. |
| برنامه آموزشی | برای کلاس‌های اول تا دوازدهم برنامه‌های آموزشی در مدارس تدوین شود که مسائل کنترل از مبدأ در ارتباط با پروژه‌های استفاده مجدد از آب برای مصارف خانگی را مورد بحث قرار دهند. |
| **برنامه پاسخ برای ترکیبات شناسایی‌شده** | |
| همکاری بین‌سازمانی | موفقیت برنامه کنترل آلاینده از مبدأ به همکاری قوی بین‌سازمانی و پاسخگویی بین WWTP و AWTF وابسته است. در مورد پروژه‌های استفاده مجددی که فاضلاب صنعتی آن‌ها از خارج از محل مورد نظر وارد می‌شود، اطمینان حاصل شود که قرارداد پذیرش پسماند با الزامات برنامه کنترل آلاینده از مبدأ سازگار باشد. در مورد پروژه‌های استفاده مجددی که سازمانی که مدیریت کنترل آلاینده از مبدأ را بر عهده دارد، همان سازمانی نیست که AWTF را بهره‌برداری می‌کند، یک یادداشت همکاری و تفاهم بین سازمان‌ها امضا شود و اقدامات لازم برای کنترل آلاینده از منشأ انجام شود و از کیفیت آب پاسداری شود. |
| پاسخ به تغییرات کیفیت آب | برنامه‌ای عملیاتی برای پاسخ به تغییرات کیفیت آب تدوین شود. برای مثال، اگر یک عنصر شیمیایی خاص در AWTF مشاهده شد، سوابق عملیات و کالیبراسیون تجهیزات اندازه‌گیری درون خطی و دیگر روش‌های تحلیلی مورد بررسی قرار گیرند. سپس اگر مشکل شناسایی نشد، WWTP آگاه شود تا برای پیدا کردن مبدأ بالقوه عنصر شیمیایی، WWTP را مورد ارزیابی و بازرسی قرار دهد. اگر در WWTP هیچ مبدأ و صنعتی یافت نشد، سپس اقدام به نمونه‌گیری از سیستم جمع‌آوری فاضلاب شود. زمانی که مشکل شناسایی شد، برنامه عملیاتی به نحوی کارکنان کنترل آلاینده از مبدأ را آگاه سازند و از آن‌ها بخواهند که به مسئله پاسخ دهند، مشکل را برطرف کنند، و در صورت نیاز، روندهایی برای دور زدن یا توقف عملکرد تأسیسات ارائه نمایند. |

کردن اثر رهاسازی‌های بزرگ صنعتی، باید توجه به منحرف کردن پساب‌های صنعتی به تأسیسات تصفیه‌ای دیگر معطوف شود. از این رو، به عنوان بخشی از برنامه استفاده مجدد از آب برای مصارف خانگی در ایران، مسئولان باید فقط فاضلاب جمع‌آوری‌شده از بخش شهری را مورد توجه قرار دهند و فاضلاب تولید شده در بخش‌های صنعتی را از شبکه فاضلاب شهری جدا سازند. البته زمانی که امکان جداسازی فاضلاب صنعتی از فاضلاب شهری وجود نداشته باشد و به اجبار به سیستم جمع‌آوری فاضلاب شهری تخلیه شود و به تأسیسات بازیابی آب منتقل شود، مسئولان باید استفاده از برنامه پیش‌تصفیه صنعتی، مشابه با برنامه ملی پیش‌تصفیه که توسط آژانس حفاظت محیط زیست ایالات متحده تدوین شده است را مورد توجه قرار دهند (APAI, 2015).

در حال حاضر چند برنامه موفق کنترل آلاینده‌ها از مبدأ توسط دفتر آب سازمان محیط زیست ایالات متحده تدوین شده‌اند و مورد بهره‌برداری قرار گرفته‌اند. این قبیل برنامه‌ها شامل «داروها را در فاضلاب نریزید»، برنامه‌های بازپس‌گیری دارو، و برنامه‌های

جمع‌آوری پسماندهای خطرناک خانگی هستند که می‌توانند در ایران بومی‌سازی و استفاده شوند. همچنین یکی دیگر از این برنامه‌ها، ارتقای برنامه پیش‌تصفیه در برخی تأسیسات فاضلاب شهری است تا امکان جلوگیری از آلاینده‌ها بیشتر شود. به‌عنوان مثال، می‌توان برنامه کنترل آلاینده‌ها از مبدأ برای تولید آب آشامیدنی از آب بازیافتی از طریق تغذیه آب زیرزمینی اورنج کانتی را نام برد.

به‌طور خاص، در سیستم تولید آب آشامیدنی از آب بازیافتی از طریق تغذیه آب زیرزمینی اورنج کانتی (Kayhanian and Tchobanoglous, 2016).

حد و حدود مقادیر برای 1,4-dioxane، N-nitrosodimethylamine (NDMA)، و سایر ترکیبات شیمیایی که اثر منفی بر حذف کل کربن آلی دارند، پیشنهاد شده است (APAI, 2015).

## ۵- ارتقای تصفیه‌خانه ثانویه فاضلاب برای استفاده مجدد از آب برای مصارف خانگی

به‌طور معمول، هدف اصلی اغلب تصفیه‌خانه‌های فاضلاب تولید پسابی است که مناسب برای رهاسازی در محیط‌زیست باشد. برای این منظور، بهره‌برداری اکثر تصفیه‌خانه‌های فاضلاب شهری برای اهداف زیر طراحی شده‌اند : ۱) حذف مواد جامد با ذرات درشت و ته‌نشین‌شونده، ۲) تبدیل اجزای محلول و ذرات تجزیه‌پذیر زیستی به محصولات نهایی قابل قبول، ۳) تبدیل ذرات جامد معلق و کلوئیدهای غیر قابل ته‌نشین شدن به توده بیولوژیکی یا بیوفیلم، ۴) حذف و یا تبدیل مواد مغذی از قبیل نیتروژن و فسفر به محصولات نهایی قابل قبول، ۵) حذف و یا تبدیل ترکیبات آلی کمیاب به ترکیبات قابل قبول دیگر، و ۶) حذف میکروارگانیسم‌های بیماری‌زا (Asano et al., 2007, Tchobanoglous et al., 2014).

اگر هدف، تولید پسابی مناسب برای تصفیه بیشتر آب بازیافتی در تأسیسات تصفیه پیشرفته آب باشد، تغییرات در طراحی و بهره‌برداری تصفیه‌خانه ثانوی فعلی و آینده الزامی است.

برای بهبود عملکرد تصفیه‌خانه‌های ثانویه موجود در ارتباط با استفاده مجدد از آب، عملکرد بخش‌هایی از تصفیه‌خانه باید ارتقا داده شود و اصلاح گردد. طرح‌های اصلاحی اعمال شده در تصفیه‌خانه‌های ثانویه موجود می‌توانند بر روی تصفیه‌خانه‌های ثانویه جدید نیز اعمال شوند. برای مثال، همان‌طور که در بخش قبلی نیز ذکر شد، تدوین یک برنامه مؤثر کنترل آلاینده‌ها از مبدأ قبل از ورود فاضلاب به تصفیه‌خانه فاضلاب ثانویه یکی از اولین و مهم‌ترین قدم‌های مؤثری است که می‌تواند برای بهبود کیفیت پساب تصفیه‌شده، برداشته شود. از این رو، تمرکز این بخش از مقاله معرفی چند اصلاح عملی برای فرایندهاست که می‌تواند برای بهبود عملکرد تصفیه‌خانه‌های موجود و طرح‌های تصفیه‌خانه‌های پیشنهادی آینده برای استفاده مجدد آب، مورد استفاده قرار گیرد. عناوین بحث شده در ارتباط با این موضوع شامل موارد زیر هستند: ۱) فرایند تصفیه ثانویه از دیدگاه استفاده مجدد از آب، ۲) بهبود کیفیت پساب از طریق تغییرات عملیاتی و ارتقای فرایند تصفیه، و ۳) مقایسه کیفیت پساب بهبود یافته در برابر پساب ثانویه معمولی.

### ۵-۱- تصفیه ثانویه فاضلاب از دیدگاه استفاده مجدد از آب

برای دستیابی به حذف کارآمد آلاینده‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی از فاضلاب، تعدادی از فرایندهای واحد با یکدیگر به‌طور گروهی به‌کار می‌روند که به آن‌ها « تصفیه زنجیره‌ای» می‌گویند. به طور سنتی، واژگان مختلفی از قبیل تصفیه مقدماتی، تصفیه ثانویه، تصفیه ثانویه پیشرفته و تصفیه پیشرفته برای تصفیه فاضلاب به‌کار برده می‌شود. تعریف و کاربرد این واژگان در جدول ۱۰ به اختصار ذکر شده‌اند.

بیشتر فرایندهای متداول تصفیه ثانویه فاضلاب، همچنین فرایندهایی که در ایران استفاده می‌شوند، از نوع تصفیه بیولوژیکی هستند، که متداول‌ترین آن فرایند لجن فعال است. نمونه‌ای از یک فرایند تصفیه ثانویه بیولوژیکی متداول که از فرایند لجن فعال استفاده می‌کند، در شکل ۲ نشان داده شده است. در بیشتر تصفیه‌خانه‌های ثانویه، آخرین مرحله تصفیه معمولاً بعد از مخزن ته‌نشینی دوم به انتها می‌رسد و در موارد کمی ممکن است از گندزدایی هم استفاده شود. البته، همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده است، برای بهبود کیفیت پساب با در نظر داشتن حدود مقادیر مواد جامد معلق بعد از زلال‌سازی ثانویه، می‌توان فیلتراسیون را به تصفیه ثانویه اضافه کرد و آن را با تبدیل به تصفیه پیشرفته ثانویه یا تصفیه ثالثیه ارتقا بخشید. همان طور که قبلاً هم گفته شد، به‌طور معمول پساب تصفیه‌خانه‌های ثانویه رایج، با در نظر گرفتن الزامات

dx.doi.org/10.22093/wwj.2018.101905.981

**جدول ۱۰**- خلاصه‌ای از حذف آلاینده‌ها توسط انواع مختلف فرآیندهای تصفیه (برگرفته از Tchobanoglous et al., 2014)

**Table 10.** Summary of constituents' removed by different treatment processes (Adapted from Tchobanoglous et al., 2014)

| نوع فرایند تصفیه | آلاینده‌های حذف‌شده |
|---|---|
| مقدماتی | حذف موادی از فاضلاب که می‌توانند باعث ایجاد اختلال در نگهداری یا عملکرد فرایندها و سیستم‌های کمکی شوند (مانند پارچه، چوب، مواد شناور، سنگ‌ریزه، و روغن) |
| اصلی | حذف بخشی از مواد جامد معلق و مواد آلی از فاضلاب |
| اصلی پیشرفته | حذف بهبود یافته مواد جامد معلق و مواد آلی از فاضلاب، که معمولاً از طریق اضافه کردن مواد شیمیایی یا فیلتراسیون انجام می‌شود |
| ثانویه | حذف بهبودیافته مواد جامد معلق (به صورت محلول یا سوسپانسیون) و جامدات معلق. از نقطه‌نظر مقررات، تصفیه ثانویه به‌صورت برقرار کردن حداقل استانداردهای BOD و کل جامدات معلق و حدود pH در پسماندهای رهاسازی شده از تصفیه‌خانه‌های فاضلاب شهری تعریف می‌شود. در بسیاری از مواقع، گندزدایی نیز به‌عنوان بخشی از تصفیه ثانویه صورت می‌گیرد. |
| ثانویه با حذف مواد مغذّی | حذف مواد آلی تجزیه‌پذیر، جامدات معلق و مواد مغذی (برای مثال نیتروژن، فسفر یا هردو). |
| ثانویه پیشرفته (ثالثیه و یا پیشرفته) | حذف مواد جامد معلق باقیمانده (بعد از تصفیه ثانویه معمول) معمولاً توسط فیلتراسیون در محیط دانه‌ای یا صافی‌های میکرو. گندزدایی اغلب در تصفیه ثانویه پیشرفته یا تصفیه ثالثیه انجام می‌شود، البته می‌تواند بعد از هر سطحی از تصفیه و قبل از رهاسازی صورت گیرد. در برخی موارد به عنوان بخشی از این گندزدایی، حذف مواد مغذی نیز انجام می‌پذیرد. |

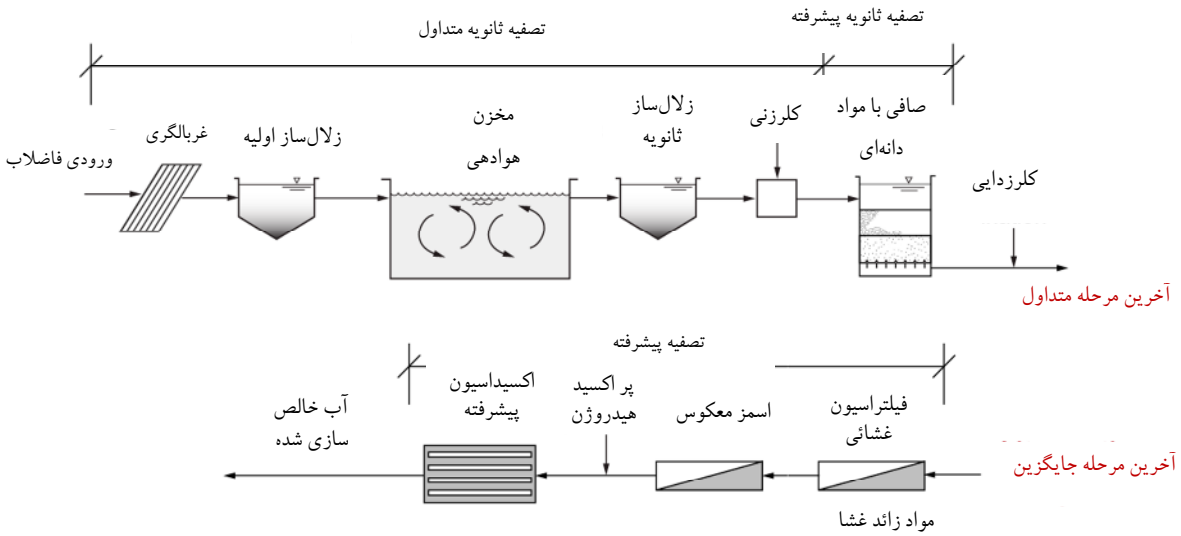



**Fig. 2.** Generalized secondary wastewater treatment process treatment train with conventional and alternative end points for the treated effluent (a) conventional discharge to the environment and (b) as an influent source water for advanced water treatment for reuse applications (Tchobanoglous et al., 2011)

**شکل ۲**- فرایند کلی تصفیه زنجیره‌ای ثانویه فاضلاب با نقاط انتهایی متداول و جایگزین برای پساب تصفیه‌شده (a) رهاسازی متداول به محیط‌زیست و (b) رهاسازی به‌عنوان منبع آب ورودی تأسیسات تصفیه پیشرفته برای استفاده مجدد (Tchobanoglous et al., 2011)

و مقررات خاص رهاسازی به محیط زیست، به درون محیط‌زیست تخلیه می‌شود. هر چند، اگر قرار باشد که پساب تصفیه‌شده، آب ورودی به تصفیه‌خانه پیشرفته باشد، الزامات و مقررات تصفیه ثانویه ممکن است نسبتاً متفاوت و یا سخت گیرانه‌تر باشند. در بخش زیر، توجه خاصی به طرح و تغییراتی شده است که منجر به بهبود کیفیت پساب تصفیه‌خانه‌های ثانویه فعلی و آینده برای بازیافت آب و استفاده مجدد آن برای مصارف خانگی و غیر خانگی می‌شود.

### ۵-۲- بهبود کیفیت پساب از طریق تغییرات عملیاتی و ارتقای فرایندهای تصفیه

ارتقای بعضی از مراحل تصفیه ثانویه برای تولید پساب با کیفیت بالاتر معمولاً چندین مزیت به همراه دارد. این مزیت‌ها شامل موارد زیر هستند: ۱) بهبود کارایی تأسیسات تصفیه‌خانه آب پیشرفته، ۲) کاهش انرژی و ردپای کربن، و ۳) مطابقت پایدار با مقررات محیط زیستی. برای مثال، اجزای کیفیتی خاصی از آب مانند عوامل بیماری‌زا، مواد شیمیایی نگران کننده (CECها)، و محصولات جانبی مواد ضد عفونی کننده (DBP)، را می‌توان از طریق بهبود فرایند تصفیه ثانویه بیولوژیکی به‌صورت مقرون به صرفه‌تری حذف کرد. برخی از اقدامات مهمی که می‌توانند برای ارتقای عملکرد تصفیه و بهبود قابلیت اطمینان و کیفیت پساب تصفیه‌خانه‌های موجود و طرح‌های پیشنهادی آینده در ایران به کار گرفته شوند، در جدول ۱۱ ارائه شده‌اند. قسمت‌های مهمی از این اقداماتی که در جدول ۱۱ توضیح داده شده‌اند، در ادامه این بخش بررسی شده‌اند.

**جدول ۱۱**- اقداماتی که می‌تواند برای بهبود عملکرد تصفیه و ارتقای کیفی تصفیه‌خانه‌های فاضلاب موجود و آینده در ایران مورد استفاده قرار گیرد (Tchobanoglous et al., 2015)

**Table 11.** Measures that could be employed to improve the treatment performance and enhance the reliability of existing and proposed WWTPs in Iran (Tchobanoglous et al., 2015)

| اقدامات | اثرات و ارزش هر اقدام | توضیحات |
|---|---|---|
| متعادل‌سازی بار و نرخ جریان ورودی | کارآیی، کیفیت آب، قابلیت اطمینان | • تصفیه بیولوژیکی پیشرفته توسط: ۱) کاهش یا حذف بارگذاری‌های ناگهانی، ۲) رقیق‌سازی ترکیبات ممنوعه، ۳) بهبود عملکرد فعالیت‌های کلی تصفیه بیولوژیکی از طریق بهبود یکپارچگی بارگذاری مواد جامد، مواد آلی و مواد مغذی.<br>• اندازه راکتورهای تصفیه بیولوژیکی می‌تواند با متعادل‌سازی جریان کاهش یابد.<br>• با متعادل‌سازی جریان، هوادهی دمنده‌ها و نرخ جریان‌های بازگشتی تثبیت می‌شوند و فقط به تنظیمات کوچک نیاز خواهند داشت.<br>• الزامات مربوط به اندازه سطح جانبی فیلتر برای فیلتراسیون ثانویه پساب کاهش می‌یابند و عملکرد فیلتر از طریق کیفیت یکسان‌تر آب فیلترشده و دوره‌های منظم بک‌واش فیلتر بهبود می‌یابد. |
| پیش‌تصفیه بهبودیافته | کارایی، قابلیت اطمینان | • حذف ترکیبات بی‌اثر که می‌تواند عملکرد تصفیه را بهبود بخشد (برای مثال، پارچه و مواد پلاستیکی).<br>• تغییر توزیع اندازه ذرات فاضلاب، که سینتیک تصفیه بیولوژیکی را بهبود می‌بخشد. |
| حذف (یا متعادل‌سازی) جریان‌های بازگشتی تصفیه‌نشده | کیفیت آب، قابلیت اطمینان | • جریان‌های بازگشتی از فرایندهای تغلیظ و آب‌گیری ایجاد می‌شوند.<br>• همه فرایندهایی که به جامدسازی مربوط می‌شوند، شامل مقادیر قابل توجهی پلیمر هستند تا فرایند آبگیری را بهبود بخشند؛ بعضی پلیمرها به عنوان مواد تشکیل‌دهنده برخی محصولات جانبی گندزدایی DBPها، مانند N-nitrosodimenthylamine (NDMA) شناسایی شده‌اند. |
| تغییرحالت در عملکرد فرایندهای تصفیه بیولوژیکی | کیفیت آب، قابلیت اطمینان | • برای بهبود عملکرد AWTF، تصفیه بیولوژیکی باید در حالت نیتریفیکاسیون/دنیتریفیکاسیون انجام شود.<br>• زمان‌های ماند با میانگین طولانی‌تر در هر سلول امکان استفاده برای حذف نیترات‌ها و بهبود حذف مواد شیمیایی آلی کمیاب و سایر ترکیبات خاص مانند فلزات را دارند. |
| پایش و کنترل بهبودیافته فرایندها | کیفیت آب، قابلیت اطمینان | • پایش تک‌تک فرایندها بهبود پیدا کند تا عملکرد بهبود یابد.<br>• انجام بررسی‌های خاص در مورد تجهیزات و روش‌های جدید پایش فرایندها.<br>• ابزارهای سنجش در خط از نظر ارائه موجودی مواد جامد و پایش کیفیت آب از طریق سنجش کدورت و هدایت الکتریکی در پساب، باید ارزیابی شوند.<br>• رویه‌ای برای نگهداری از تجهیزات اندازه‌گیری باید برقرار شود، که کارکنان مخصوص به خود را داشته باشد تا اطمینان حاصل شود که تجهیزات به درستی کالیبره و به صورت دوره‌ای با اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی بررسی شده و نقاط عملکرد شناسایی شده‌اند (همچنین فلوچارت مسئولیت‌ها نیز ضروری است). |

dx.doi.org/10.22093/wwj.2018.101905.981

### ۵-۲-۱- متعادل‌سازی نرخ جریان و بار هیدرولیکی

متعادل‌سازی نرخ جریان و بار هیدرولیکی به‌کار گرفته، مزایای قابل توجهی دارد شامل موارد زیر است: ۱) بهبود تصفیه بیولوژیکی از طریق بر طرف کردن شوک‌های بارگذاری روزانه، رقیق شدن مواد مضر و تثبیت pH ، ۲) بهبود کیفیت پساب و عملکرد غلیظ‌سازی محفظه‌های ته‌نشینی بعد از تصفیه بیولوژیکی از طریق بهبود یکپارچگی در بارگذاری مواد جامد و حذف جریان‌های شدید ناگهانی، ۳) بهبود عملکرد سیستم‌های تصفیه ثالثیه، ۴) عملکرد بهتر سیستم‌های فیلتراسیون توسط نرخ‌های کمتر هیدرولیکی و سیکل‌های بک‌واش منظم‌تر، و ۵) کاهش بارگذاری جرمی، کنترل ورودی مواد شیمیایی و ارتقای کیفیت فرایند هرکجا که از تصفیه شیمیایی استفاده می‌شود. غیر از بهبود عملکرد بیشتر تصفیه‌خانه‌ها، متعادل‌سازی جریان می‌تواند برای بهبود عملکرد تصفیه‌خانه‌هایی که بار بیش از حد به آنها وارد می‌شود نیز مورد استفاده قرار گیرد (Tchobanoglous et al., 2014).

در آینده، این امکان وجود دارد که در ایران فرایندهای لجن فعال فعلی با روش‌های جدیدتر و کارآمدتر از قبیل بیوراکتورهای غشایی جایگزین شود. از آنجا که عملکرد MBRها نسبت به نوسانات نرخ جریان ورودی حساس است، لذا عموماً نیاز به متعادل‌سازی نرخ جریان می‌باشد. هرکدام از تولیدکنندگان تجهیزات غشایی معیارهای خودشان را برای اندازه‌گیری به کار می‌بندند، که معمولاً شامل بیشینه و میانگین روزانه نرخ جریان است. به طور کلی، برای آنکه MBR عملکرد بهتری داشته باشد، حداکثر نرخ جریان باید به ۱/۵ برابر نرخ جریان متوسط محدود شود. در بسیاری از کاربردها، حداکثر نرخ جریان، عامل کلیدی در تعیین انتخاب نوع سیستم غشایی و تعداد ماژول‌های مورد نیاز است.

### ۵-۲-۲- تصفیه مقدماتی پیشرفته

دغدغه صرفه‌جویی در انرژی و کاهش ردپای کربن، مسئولان شهری را باید وادار کند که خلاق باشند و از تکنولوژی‌های تصفیه‌ای استفاده کنند که به این موضوعات توجه بیشتری داشته باشند و یا حتی این مشکلات را برطرف کنند. امروزه چند تکنولوژی جایگزین جدید در حال استفاده و یا در حال توسعه هستند. یکی از این تکنولوژی‌ها شامل فرایند فیلتراسیون با استفاده از فیلتر پارچه‌ای به‌عنوان جایگزینی برای تصفیه با ته‌نشینی اولیه است (شکل ۳). مزیت‌های اصلی فرایند فیلتراسیون پارچه‌ای شامل موارد زیر است: ۱) نیازمند یک پنجم فضای زلال‌کننده‌های متداول است، ۲) عملکرد بهتری را ارائه می‌کند، و ۳) مقرون به صرفه‌تر است.

علاوه بر آن به مزیت‌های دیگری نیز می‌توان اشاره کرد از جمله: ۱) افزایش کارایی تصفیه بیولوژیکی به‌دلیل تغییر اندازه ذراتی که به فرایند بیولوژیکی وارد می‌شوند، ۲) کاهش مصرف انرژی برای مصرف انرژی هوادهی، ۳) کاهش حجم مورد نیاز برای حوضچه هوادهی، ۴) کاهش الزامات انرژی برای مخلوط کردن در حوضچه هوادهی، ۵) افزایش ظرفیت تصفیه ثانویه، و ۶) افزایش تولید انرژی بیوگاز در راکتور بی‌هوازی به دلیل حذف بیشتر مواد آلی از فاضلاب خام. لازم به ذکر است که فیلتر پارچه‌ای برای فیلتراسیون پساب نیز به کار گرفته می‌شود. یک نمونه از فرایند ارتقا یافته لجن فعال با به کارگیری فیلترهای پارچه‌ای در شکل ۳ به نمایش در آمده است.

### ۵-۲-۳- کاهش یا حذف جریان‌های بازگشتی تصفیه‌نشده

در تصفیه فاضلاب، جریان‌های مایع از جداسازی آب از لجن‌های اصلی، ثانویه، ترکیبی یا از لجن هضم‌شده در طی فراوری مواد جامد ایجاد می‌شوند. واژه "جریان‌های بازگشتی" برای توصیف این جریان‌های مایع استفاده می‌شود که ویژگی‌های شیمیایی خاصی دارند که مانع از رهاسازی مستقیم آن‌ها به همراه پساب تصفیه‌خانه می‌شود. متأسفانه، جریان‌های بازگشتی می‌توانند حاوی ترکیبات آلی قابل حل شدن نیتروژن، آمونیوم، ترکیبات غیر آلی غیر محلول و بسیاری ترکیبات دیگر باشند. رویکرد فعلی در بسیاری از تصفیه‌خانه‌های فاضلاب، انتقال مجدد این جریان‌ها به ابتدای تصفیه‌خانه یا به فرایند تصفیه ثانویه برای تصفیه بیشتر، به‌ویژه در ساعات روز، است. با توجه به این که جریان‌های بازگشتی شامل ترکیباتی هستند که می‌توانند به‌طور قابل توجهی بر عملکرد فرایند تصفیه ثانویه اثر منفی و یا مثبت بگذارند، مدیریت آن‌ها باید به‌طور کارآمدتری کنترل شوند.

یک روش که برای آرام کردن این جریان‌های بازگشتی مورد استفاده قرار گرفته است، عبارت است از فراهم کردن متعادل‌سازی جریان و رهاسازی آن به جریان تصفیه‌خانه در ساعات اولیه روز که

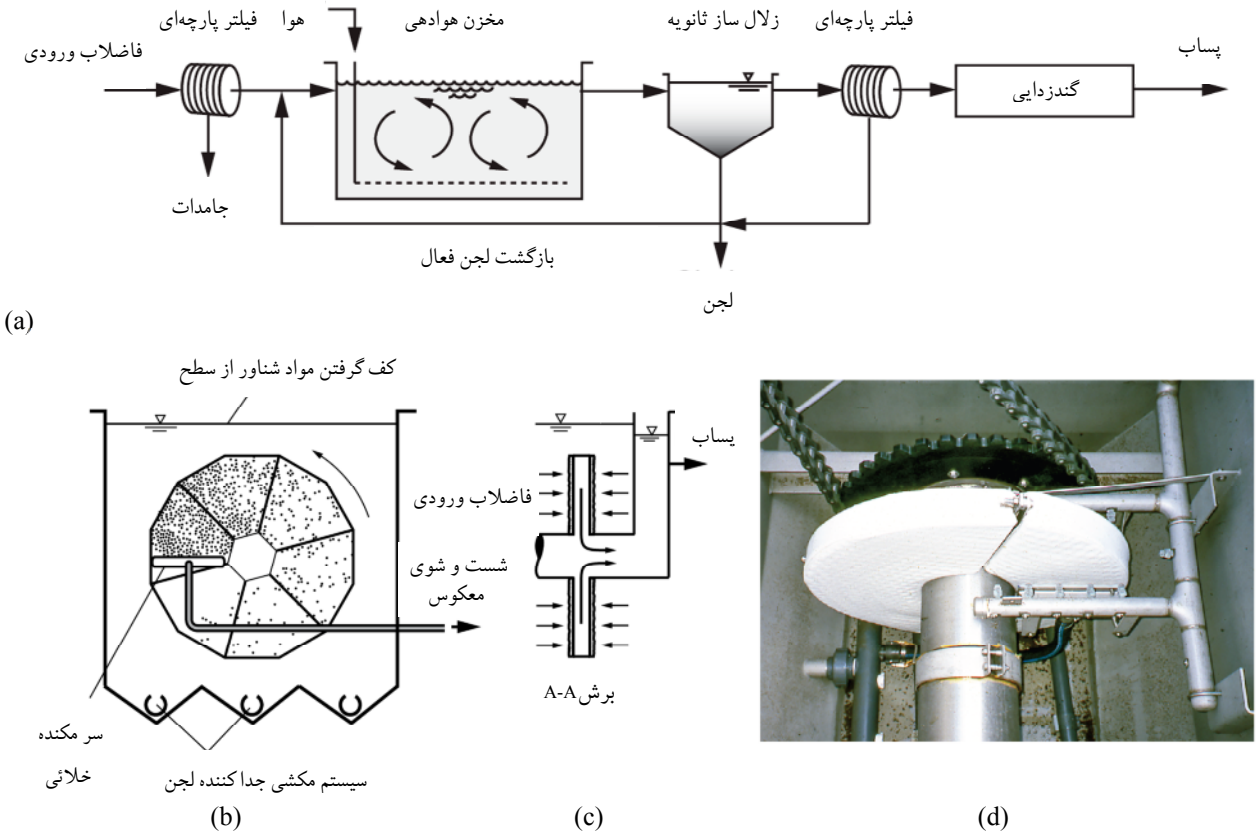



**Fig. 3.** Use of cloth filters in wastewater treatment:(a) treatment process flow diagram illustrating the use of cloth filter as a replacement for primary sedimentation and for effluent filtration, (b) schematic of cloth filter with vacuum suction for the removal of accumulated solids, (c) cross section through filter disk, (d) view of single disk cloth filter. (Adapted in part from Tchobanoglous et al., 2014)

**شکل ۳**- استفاده از فیلترهای پارچه‌ای در تصفیه فاضلاب: (a) نمودار جریان فرایند تصفیه که استفاده از فیلتر پارچه‌ای را به‌عنوان جایگزینی برای ته‌نشینی مقدماتی و برای فیلتراسیون پساب نشان می‌دهد، (b) تصویری شماتیک از فیلتر پارچه‌ای با مکش خلاء برای حذف مواد جامد تجمع یافته، (c) برش عرضی دیسک فیلتر، (d) نمایی از یک فیلتر پارچه‌ای تک دیسکی (Tchobanoglous et al., 2014)

در آن ظرفیت یکسان‌سازی بیشتری مهیاست. همان‌طور که قبلاً هم بحث شد، اگر حوضچه‌های ته‌نشینی اصلی با فیلترهای پارچه‌ای جایگزین شوند، حوضچه ته‌نشینی اصلی می‌تواند به‌عنوان حوضچه متعادل‌سازی مورد استفاده قرار گیرد. در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب بزرگ و به‌ویژه در تصفیه‌خانه‌هایی که پساب تصفیه‌شده آنها در معرض الزامات و مقررات رهاسازی سختگیرانه‌تری هستند، امکان این وجود دارد که تصفیه مجزایی برای جریان‌های بازگشتی فراهم آورده شود تا از آب بازیافتی بتوان برای استفاده مجدد در مصارف خانگی بهتر بهره برد. انتظار می‌رود که استفاده از این روش در آینده افزایش یابد. در بعضی از سیستم‌های تصفیه اقماری، مشکل جریان‌های فاضلاب بازگشتی کلاً حذف شده است. در چنین تصفیه‌خانه‌هایی، همه جریان‌های بازگشتی به شبکه اصلی جمع‌آوری فاضلاب وارد می‌شود تا در تأسیسات تصفیه‌خانه مرکزی پایین‌دست تصفیه شود.

### ۵-۲-۴- نیتریفیکاسیون و دی‌نیتریفیکاسیون پیشرفته

نیتریفیکاسیون و دی‌نیتریفیکاسیون پیشرفته به‌ویژه زمانی که در تأسیسات تصفیه پیشرفته آب از فیلتراسیون غشایی استفاده شده باشد، سودمند هستند. پژوهش‌های انجام شده نشان داده است که نرخ خرابی غشاهای UF، زمانی که فرایند تصفیه در حالت بدون نیتریفیکاسون انجام شود، با ضریبی حدوداً برابر ۱۰ افزایش پیدا می‌کند. نرخ‌های خرابی مشاهده‌شده به‌طور عمده به کلوئیدهای آلی

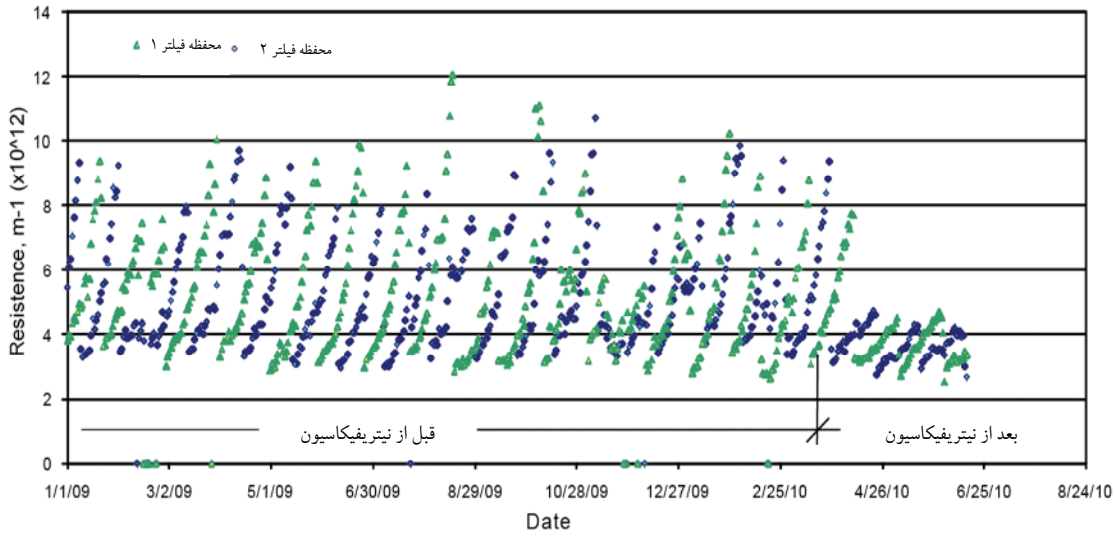



**Fig. 4.** Observed membrane fouling, measured as resistance (1/m), at OCWD GWRS before and after wastewater treatment plant switched to nitrification mode of operation March 2010 (Tchobanoglous et al., 2015)

**شکل ۴**- عملکرد مشاهده شده در غشاها در تصفیه‌خانه پیشرفته OCWD GWRS که به‌صورت مقاومت (1/m) اندازه‌گیری شده است، قبل و بعد از تغییر عملکرد تصفیه‌خانه در ماه مارس ۲۰۱۰ به حالت نیتریفیکاسیون (Tchobanoglous et al., 2015)

بزرگ‌تر از ۱۰۰۰۰ دالتون نسبت داده شده است (Salveson et al., 2012)

دی‌نیتریفیکاسیون این مزیت را نیز دارد که درجه حذف نیتراتی که باید در تأسیسات تصفیه پیشرفته آب به‌دست‌آید را افزایش می‌دهد. به‌عنوان مثال، تأسیسات تصفیه پیشرفته آب و تولید آب آشامیدنی از آب بازیافتی در اورنج کانتی کالیفرنیا، در ابتدا از پساب ثانویه بدون نیتریفیکاسیون استفاده می‌کرد. ولی از سال ۲۰۱۰، تغییراتی عملیاتی اعمال شد که به تأسیسات اجازه می‌داد از فرایند لجن فعال با عملکرد نیتریفیکاسیون استفاده کنند. در حال حاضر، آب ورودی به OCWD GWRS شامل تقریباً ۸۰ درصد لجن فعال است که شامل نیتریفیکاسیون / دی‌نیتریفیکاسیون می‌شود و ۲۰ درصد از پساب فیلتر تأمین می‌شود. در مقایسه با تصفیه قبلی که بدون نیتریفیکاسیون / دی‌نیتریفیکاسیون انجام می‌شد، این تغییرات عملیاتی باعث کاهش قابل توجهی (تا ۵۰ درصد) در ایجاد مقاومت در تصفیه سیستم MF می‌شود (شکل ۴). بر اساس بهبود عملکرد ثبت‌شده برای فرایندهای غشایی، همان‌طور که در شکل ۴ نشان داده شده است، اگر قرار باشد تصفیه‌خانه‌های فاضلاب موجود برای تولید پسابی استفاده شوند که بعداً در AWTF مورد تصفیه پیشرفته قرار گیرد تا از آن برای استفاده مجدد به‌منظور مصارف خانگی بهره‌برداری شود، تا حد مقدور باید از نیتریفیکاسیون / دنیتریفیکاسیون استفاده شود.

### ۵-۲-۵- پایش و کنترل پیشرفته فرایندها

علاوه بر تغییرات فرایندی و عملکردی که در بالا بحث شد، هر تصفیه‌خانه‌ای که برای تولید پساب تصفیه‌شده به‌منظور استفاده مجدد برای مصارف خانگی طراحی و بهره‌برداری شده باشد، باید از پایش و کنترل پیشرفته فرایندها بهره ببرد. برای فراهم کردن کنترل مناسب و قابل اطمینان، تجهیزات تصفیه زنجیره‌ای باید بتوانند پارامتر مورد نظر را بالغ بر ده تا سی برابر ثابت زمان آن پارامتر اندازه‌گیری کنند. ثابت زمان برای یک پارامتر، به‌صورت زمان مورد نیاز برای عملکرد آن پارامتر برای رسیدن به ۶۳/۲ درصد تغییر بین شرایط ابتدا و انتها، بعد از اعمال آشفتگی، تعریف می‌شود (Tchobanoglous et al., 2003). ثابت‌های زمان برای پارامترهای مختلف می‌توانند از کمتر از یک ثانیه (برای مثال، فشار) تا بیشتر از یک روز برای زمان ماند جامدات[1]، متغیر باشند. زمانی که قرار باشد پساب تصفیه شده به‌منظور استفاده مجدد برای مصارف خانگی مورد استفاده قرار گیرد، احتیاج مبرمی به ابزارهای

[1] Solid Retention Time (SRT)

**جدول ۱۲**- بازه معمول کیفیت پساب فاضلاب تصفیه‌شده بر اساس فرایندهای تصفیه‌ای منتخب (Tchobanoglous et al., 2015)

**Table 13.** Typical range of wastewater effluent quality produced from selective treatment processes (Tchobanoglous et al. 2015)

| ترکیبات / پارامترهای کیفیت آب | واحد | بازه کیفیت پساب بر اساس فرایندهای تصفیه‌ای منتخب | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | CAS[a] | CAS با فیلتراسیون | CAS با BNR | CAS با BNR و فیلتراسیون | بیوراکتور غشایی |
| TSS | mg/L | ۵-۲۵ | ۲-۸ | ۵-۲۰ | ۱-۴ | <۱-۵ |
| کدورت | NTU | ۲-۱۵ | ۱-۵ | ۱-۵ | ۱-۵ | <۱-۲ |
| BOD | mg/L | ۵-۲۵ | <۵-۲۰ | ۵-۱۵ | ۱-۵ | <۱-۵ |
| COD | mg/L | ۸۰-۴ | ۳۰-۷۰ | ۲۰-۴۰ | ۲۰-۳۰ | <۱۰-۳۰ |
| TOC | mg N/L | ۲۰-۴۰ | ۱۵-۳۰ | ۱۰-۲۰ | ۱-۵ | <۰/۵-۵ |
| نیتروژن - آمونیاک | mg N/L | ۱-۱۰ | ۱-۶ | ۱-۳ | ۱-۲ | <۱-۵ |
| نیتروژن - نیترات | mg N/L | ۵-۳۰ | ۵-۳۰ | <۲-۸ | ۱-۸ | <۸ |
| نیتروژن - نیتریت | mg N/L | 0-trace | 0-trace | 0-trace | ۰/۰۰۱-۰/۱ | 0-trace |
| TN | mg N/L | ۱۵-۳۵ | ۱۵-۳۵ | ۳-۸ | ۲-۵ | <۱۰ |
| TP | mg P/L | ۳-۱۰ | ۳-۸ | ۱-۲ | <۱ | ۰/۳-۵ |
| VOC | µg/L | ۱۰-۴۰ | ۱۰-۴۰ | ۱۰-۲۰ | ۱۰-۲۰ | ۱۰-۲۰ |
| آهن و منگنز | mg/L | ۱-۱۵ | ۱-۱/۴ | ۱-۱/۵ | ۱-۱/۵ | Trace |
| سورفکتانت‌ها | mg/L | ۰/۵-۲ | ۰/۵-۱/۵ | ۰/۱-۱ | ۰/۱-۱ | ۰/۱-۰/۵ |
| TDS | mg/L | ۳۷۴-۱۱۲۱ | ۳۷۴-۱۱۲۱ | ۳۷۴-۱۱۲۱ | ۳۷۴-۱۱۲۱ | ۳۷۴-۱۱۲۱ |
| ترکیبات شیمیایی کمیاب | µg/L | ۵-۴۰ | | | | |
| کل کلیفرم | No./100 mL | $۱۰^{۴}$-$۱۰^{۵}$ | $۱۰^{۳}$-$۱۰^{۵}$ | $۱۰^{۴}$-$۱۰^{۵}$ | $۱۰^{۴}$-$۱۰^{۵}$ | <۱۰۰ |
| کیست‌های پروتوزوا | No./100 mL | $۱۰^{۱}$-$۱۰^{۲}$ | ۰-۱۰ | ۰-۱۰ | ۰-۱۰ | ۰-۱۰ |
| ویروس‌ها | PFU/100 mL | $۱۰^{۱}$-$۱۰^{۴}$ | $۱۰^{۱}$-$۱۰^{۳}$ | $۱۰^{۱}$-$۱۰^{۳}$ | $۱۰^{۱}$-$۱۰^{۳}$ | $۱۰^{۰}$-$۱۰^{۳}$ |

[a]CAS = Conventional activated sludge

اندازه‌گیری دقیق در خط برای فرایندها وجود خواهد داشت.

هدف بیشتر ابزارهای در خط برای کنترل و عملکرد فرایندها از طریق اندازه‌گیری مقادیر یک یا چند پارامتر از جمله SRT، اکسیژن محلول[1]، یا عمق لجن ته‌نشینی در یک بازه محدود مقدور است. البته لازم به ذکر است که عمل کنترل فرایند، زمانی که تغییرات در شرایط خارجی، مانند تغییرات نرخ جریان به وسیله متعادل‌سازی جریان، کمینه شوند به مراتب راحت‌تر خواهد بود. تدوین استراتژی‌های عملکردی از طریق شبیه‌سازی ریاضی نیز توسط بسیاری از شرکت‌های فاضلاب مورد استفاده قرار گرفته است. یکی دیگر از رویکردهای فعلی که در آینده نیز مهم‌تر جلوه خواهد کرد، تدوین برنامه‌های ادامه‌دار برای آزمایش و ارزیابی فناوری‌های جدید است.

## ۵-۳- مقایسه بین کیفیت پساب تصفیه شده بهبود یافته و معمولی

همان‌طور که انتظار می‌رود، کیفیت پساب تصفیه شده ثانویه به نوع فرایند تصفیه به کار گرفته‌شده در تصفیه‌خانه فاضلاب بستگی دارد. مقادیر اندازه‌گیری شده نمونه کیفیت پساب تولیدی تصفیه‌خانه‌های ثانویه براساس فرایندهای تصفیه‌ای منتخب، در ستون سوم تا پنجم جدول ۱۲ خلاصه شده‌اند. مقادیر اندازه‌گیری شده در ستون ششم ویژگی‌های پساب تولید شده را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، گرچه تمامی تصفیه‌های زنجیره‌ای الزامات تصفیه ثانویه آژانس حفاظت محیط‌زیست ایالات متحده را رعایت می‌کنند، تفاوت کیفیت پساب نهایی بیشتر مربوط به مقادیر در ارتباط با مواد مغذی، فلزات، عوامل بیماری‌زا، و اندازه‌گیری غلظت‌های جامدات و مواد آلی است. لازم به ذکر است که داده‌های ارائه‌شده در

[1] Disolved Oxygen (DO)

dx.doi.org/10.22093/wwj.2018.101905.981

جدول ۱۲ بیشتر جنبه حالت خاص دارند تا جنبه عمومی و همگانی و لذا باید با احتیاط مورد استفاده قرار گیرند.

## ۶- حائل‌های زیست‌محیطی برای پروژه استفاده مجدد از آب به‌منظور مصارف خانگی

همان‌طور که پیش‌تر بیان شد، تفاوت اصلی بین سیستم‌های استفاده مجدد از آب برای مصارف خانگی به‌طور غیر مستقیم IPR و استفاده مجدد از آب برای مصارف خانگی به‌طور مستقیم DPR مربوط به استفاده از حائل محیط‌زیستی می‌شود. در سیستم‌های IPR، آب بازیافتی تصفیه شده پیشرفته قبل از آن که برای استفاده شرب برداشت شود، مدتی طولانی در محیط حائل طبیعی باقی می‌ماند. حائل‌های زیست‌محیطی طبیعی که در سیستم‌های IPR مورد استفاده قرار می‌گیرند، عمدتاً عبارت‌اند از تغذیه آب زیرزمینی و تقویت آب سطحی. در سیستم‌های DPR، به‌کارگیری حائل محیط‌زیستی طبیعی ضروری نیست و فقط در شرایط نیاز، از حائل آب مهندسی‌شده استفاده می‌شود.

### ۶-۱- تغذیه آب زیرزمینی

زمانی که از آب زیرزمینی به‌عنوان حائل محیط‌زیستی استفاده شود، آب تولید شده از تأسیسات تصفیه پیشرفته آب، از طریق پخش سطحی یا با تزریق مستقیم به سفره آب زیرزمینی تغذیه می‌شود.

به‌کارگیری نوع تصفیه بستگی به سیستم تغذیه آب بازیافتی دارد، ولی تصفیه پیشرفته برای هر دو نوع تغذیه آب زیرزمینی ضروری است. به‌طور کلی تغذیه آب زیرزمینی از پخش سطحی و تراوش آن به سطح زیرین، با پخش آب تصفیه شده پیشرفته در حوضچه‌های سطحی با خاکی که خاصیت نفوذپذیری بالا دارند و یا خاک با خاصیت نفوذپذیری پایین مخلوط شده با ماسه، صورت می‌پذیرد. آب تغذیه‌ای در حوضچه‌های سطحی می‌تواند ترکیبی از آب تصفیه شده پیشرفته و رواناب‌های حاصل از بارندگی محلی باشد. در روش تزریق مستقیم، آب تصفیه شده پیشرفته از طریق چاه به سفره آب زیرزمینی تزریق می‌شود. در مقایسه با پخش سطحی، تزریق مستقیم معمولاً به تصفیه پیشرفته‌تر آب بازیافتی نیاز دارد و این به دو دلیل است: ۱) برای کاهش پتانسیل گرفتگی خاک زیر سطح زمین قبل از رسیدن به چاه، و ۲) برای جبران نبود تصفیه توسط خاک سفره آب زیرزمینی با تزریق مستقیم به چاه‌های عمیق. یک نوع از سیستم تزریق مستقیم با تغذیه مدیریت‌شده آبخوان در کالیفرنیا به‌مدت تقریباً ۵۰ سال است که با موفقیت بهره‌برداری می‌شود و منبع آب نزدیک به ۶۰ درصد جمعیت بخشی از شهر لس‌آنجلس را تأمین می‌نماید.

چندین ایالت، برای تقویت آب زیرزمینی با آب بازیافتی مقررات قانونی وضع کرده‌اند و سخت‌ترین مقررات قانونی متعلق به ایالت کالیفرنیا است. برخی از ضوابط و مقررات اصلی کالیفرنیا در جدول ۱۳ گزارش شده است. همان‌طور که در جدول ۱۳ ملاحظه می‌شود، درجه‌بندی الزامات تصفیه با نوع روش به کارگیری برای تغذیه آب زیرزمینی تغییر می‌کند. همچنین لازم به ذکر است که الزامات ذکر شده در جدول ۱۳ عمدتاً به کیفیت فاضلاب اشاره می‌کند ولی توجه به الزامات دیگر نیز لازم است. این الزامات عبارت‌اند از مدیریت مقدار آبی که می‌تواند تغذیه شود، تدوین برنامه عملیاتی، و الزامات دراز مدت پایش و گزارش. اگر تأسیسات تصفیه فاضلاب برای بازیافت آب برای مصارف خانگی در ایران توسعه پیدا کنند، با استفاده از الزامات ذکرشده در جدول ۱۳، می‌توان ابتدا از پخش سطحی برای تغذیه آب زیرزمینی استفاده کرد. با گذشت زمان و با توسعه تأسیسات پیشرفته تصفیه آب، از طریق تزریق مستقیم آب بازیافتی برای تغذیه آبخوان‌های عمیق نیز می‌توان بهره برد.

### ۶-۲- تقویت آب سطحی

در استفاده از تقویت آب سطحی به‌عنوان حائل طبیعی محیط‌زیستی، ATW تولید شده از طریق تأسیسات پیشرفته تصفیه آب قبل از انتقال به تصفیه‌خانه آب شرب،[1] با آب سطحی مخلوط می‌شود. تقویت آب سطحی منافع دیگری مانند ایجاد موقعیت برای ذخیره آب در صورت وقوع مشکلات تصفیه‌ای در زمان اضطراری دارد. همچنین ممکن است باعث تصفیه بیشتر و بالا بردن کیفیت آب بازیافتی شود. البته کارایی تصفیه بیشتر در آب سطحی به کیفیت پساب آب بازیافتی، کیفیت آب حائل و شرایط محیط زیستی آب سطحی ارتباط دارد (Tchobanoglous et al., 2015). یک نمونه از تقویت برنامه‌ریزی شده منبع آب سطحی با آب بازیافت شده از سال ۱۹۷۸ در فیرفکس کانتی[2] ویرجینیا مورد

[1] Drinking Water Treatment Plant (DWTP)
[2] Fairfax County

**جدول ۱۳**- الزامات اصلی برای تقویت آب زیرزمینی با درجات مختلف تصفیه فاضلاب در کالیفرنیا

**Table 13.** Key requirements for groundwater augmentation with various levels of treated wastewater in California

| الزامات مورد نیاز | شرح |
|---|---|
| **روش تغذیه و درجه الزامات تصفیه** | |
| **روش اعمال تغذیه** | **درجه الزامات تصفیه** |
| تغذیه آب زیر زمینی از طریق مخزن‌های سطحی با آب تصفیه شده پیشرفته بدون استفاده از اسمز معکوس | اکسیداسیون، فیلتراسیون، گندزدایی، تصفیه توسط خاک سفره آب |
| تغذیه آب زیر زمینی از طریق مخزن های سطحی با آب تصفیه شده پیشرفته با استفاده از اسمز معکوس | اکسیداسیون، اسمز معکوس، اکسیداسیون پیشرفته، تصفیه توسط خاک سفره آب |
| تغذیه آب زیر زمینی از طریق تزریق آب تصفیه شده پیشرفته با استفاده از اسمز معکوس | اکسیداسیون، اسمز معکوس، فرایند اکسیداسیون پیشرفته |
| **الزامات کیفیت آب و درجه الزامات حذف آلاینده‌ها** | |
| **الزامات کیفیت آب** | **درجه الزامات حذف آلاینده‌ها** |
| کاهش کلی عوامل بیماری‌زا[a] | ویروس‌ها 12-log ≥ |
| | کیست Giardia ≥10-log |
| | کیست Cryptosporidium ≥10-log |
| MLCها در آب شرب | همگی به جز نیتروژن |
| مقادیر در دست اقدام برای آب شرب | سرب و مس |
| کل نیتروژن | ≤ 10 mg/L<br>حد نیتروژن می‌تواند در آب بازیافت شده یا در ترکیب با سایر آب‌های رقیق‌کننده برآورده شود. |
| کل کربن آلی بر حسب mg/L | TOC≤ 0.5/RWC[b] |
| **سایر شرایط و الزامات** | |
| کیفیت آب خام | پیش‌تصفیه صنعتی و برنامه کنترل از منشأ |
| کاهش ویروس‌ها | مقدار log ۱ به ازای هر ماه ماند در زیر سطح زمین |
| کاهش *Giardia* و *Cryptosporidium* | هرکدام ۱۰log برای پساب تصفیه ثالثیه و گندزدایی شده، یا حداقل ۶ ماه زمان ماند در زیر سطح زمین |

[a] الزامات کلی تصفیه عوامل بیماری‌زا می‌تواند توسط تصفیه پیشرفته آب یا توسط ترکیبی از تصفیه فاضلاب و تصفیه صورت گرفته در زیر سطح زمین که تابعی از زمان ماند است، برآورده شود. حداقل الزامات تصفیه که قبل از پخش آب در حوضچه‌های سطحی باید برآورده شوند نیز ذکر گردیده‌اند.

[b] Recycled Water Contribution (RWC)

استفاده قرار گرفته است (https://www.uosa.org/IndexUOSA.asp).

همانند تغذیه آب زیرزمینی، چند ایالت برای تقویت آب سطحی قوانینی تدوین کرده‌اند یا در حال تدوین مقررات جدید هستند. به‌عنوان مثال ایالت کالیفرنیا در سال ۲۰۱۷ ضوابط و مقرراتی برای تقویت آب سطحی در نظر گرفت. از بسیاری جهات، مقررات مربوط به حذف عوامل بیماری‌زا همانند مقررات مربوط به تغذیه آب زیرزمینی است. بزرگ‌ترین تفاوت در بین این مقررات، زمان ماند و الزامات مربوط به اختلاط آب است. حداقل مشخصه لازم از نظر تئوری برای زمان ماند آب بازیافتی در مخزن آب سطحی نباید کمتر از ۱۸۰ روز باشد. در آب برداشتی از مخزن آب سطحی تقویت شده برای مصارف خانگی و آشامیدنی براساس الزامات اختلاط نباید بیشتر از یک درصد حجمی آب بازیافتی تصفیه‌شده در یک بازه ۲۴ ساعته باشد. درشرایط خاص، نسبت اختلاط آب بازیافتی با آب سطحی می‌تواند تا ۱۰ درصد افزایش یابد. این حجم اختلاط زمانی قابل اجراست که آب بازیافتی تصفیه شده در معرض تصفیه بیشتر قرار گیرد، به‌طوری که حداقل 1log کاهش در ویروس‌های روده‌ای، کیست‌های *ژیاردیا*، و *کریپتوسپوریدیوم* حاصل شود.

## ۶-۳- حائل آب ذخیره شده مهندسی در DPR

در سیستم DPR، اغلب به جای حائل طبیعی محیط زیستی از حائل آب ذخیره شده مهندسی استفاده می‌شود. هدف اصلی استفاده از ESB در سیستم‌های DPR، نگهداری آب فاقد ویژگی‌های لازم

dx.doi.org/10.22093/wwj.2018.101905.981

برای مصارف خانگی برای زمانی است که تصفیه‌خانه یا فرایند تصفیه دچار مشکلاتی شده باشد. به این ترتیب از رهاسازی آب بازیافتی با تصفیه پیشرفته و بدون کیفیت کافی، به تصفیه‌خانه آب شرب یا سیستم توزیع آب شرب جلوگیری می‌شود. به‌طور کلی، حجم حائل آب ذخیره شده مهندسی بستگی به مدت زمانی دارد که سیستم تصفیه خارج شده از مدار، ترمیم شود و هیچ اثر منفی دیگری در کیفیت نهایی آب به وجود نیاید. طراحی و بهره‌برداری از ESB از چند طریق مانند خطوط لوله با جریان منقطع، ذخایر تانکی اختلاط، و یا ذخایر تانکی موازی امکان‌پذیر است (Tchobanoglous et al., 2011).

با کنترل مناسب و پایش پایدار، عمل کلرزنی یا ازن زنی می‌تواند در کنار ESB مورد استفاده قرار گیرد تا در خنثی کردن عوامل بیماری‌زا در برابر آب بازیافتی با تصفیه پیشرفته و بهبود کیفیت آب، مؤثر واقع شود (Tchobanoglous et al., 2015). در برخی مواقع، به جای ESB به‌دلیل الزامات بالای ردپای کربن و قیود هیدرولیکی مربوط به آن، استفاده از تصفیه اضافی در بالادست ESBها، مطلوب‌تر است. لازم به ذکر است که برخی مؤسسات مدیریت آب اعتقاد دارند که وارد کردن ATW به ESB هیچ بهبود کیفیتی در آب ایجاد نمی‌کند، و حتی ممکن است از کیفیت آب AWT در معرض حائل آب ذخیره شده مهندسی تا حدی کاسته شود. هر زمان که بتوان AWT با عملکرد قابل اطمینان و اثبات‌شده تولید کرد و کیفیت آن را بتوان به سرعت و با صحت بالا سنجید، استفاده از DPR بدون ESB می‌تواند قابل توجیه باشد. علاوه بر این، برخی سازمان‌های مدیریت آب معتقدند که اختلاط ATW با سایر آب‌ها قبل از تصفیه در تأسیسات تصفیه متداول آب شرب، مانع کافی برای حفظ سلامت عمومی است. برای مثال، دو تا از سیستم‌های فعلی DPR که در بیگ‌اسپرینگ[1] تگزاس و ویندهوک نامیبیا مورد استفاده قرار گرفته‌اند، از ESB استفاده نمی‌کنند.

## ۷- نتیجه‌گیری

اطّلاعات مقدماتی و زمینه‌ای در مورد استفاده مجدد از آب برای مصارف خانگی در بخش اول ارائه شد. در بخش دوم به مسائل فنی و مقررات سلامت عمومی و زیست محیطی در ارتباط با به‌کارگیری استفاده مجدد از آب برای مصارف خانگی پرداخته شد. مسائل فنی مهمی که در این بخش مورد بحث قرار گرفت عبارت بودند از: نگرانی از سلامت عمومی، انواع فرایندهای واحد مورد استفاده در تصفیه زنجیره‌ای پیشرفته، اهمیت کنترل آلاینده‌ها از مبدأ، بهبود کیفیت پساب از طریق تصفیه ثانویه پیشرفته، و به‌کار گیری حائل‌های محیط زیستی در استفاده مجدد از آب برای مصارف خانگی.

از نقطه نظر سلامت عمومی، اهداف AWTFها حذف خطرات جدی مانند عوامل بیماری‌زا، و کمینه کردن پتانسیل خطرات مزمن مانند ترکیبات شیمیایی است. برای حفظ سلامت عمومی، ایالت کالیفرنیا مقررات کاهش لگاریتمی عوامل بیماری‌زا را در حد ۱۲log برای ویروس‌های روده‌ای، ۱۰log برای کریپتوسپوریدیوم، و ۹log برای کل باکتری‌های کلیفرم توصیه کرده است. حذف مواد شیمیایی آلی کمیاب معمولاً توسط پارامترهای جایگزین از قبیل TOC و COD سنجیده می‌شود. چون هیچ واحد تصفیه‌ای به‌طور مجزا قادر به حذف این آلاینده‌های شیمیایی نیست، چند واحد فرایندی که معمولاً در یک گروه به‌صورت سری استفاده می‌شوند و به "تصفیه زنجیره‌ای" موسوم هستند، در AWTFها مورد استفاده قرار می‌گیرند. بنا به موقعیت و الزامات تصفیه، AWTFها، با و یا بدون تصفیه RO طراحی می‌شوند.

به‌منظور بهینه کردن عملکرد AWTFها برای حذف عوامل بیماری‌زا و TrOCها، باید به کنترل آلاینده‌های شیمیایی از مبدأ و ارتقای تصفیه ثانویه، توجه خاصی معطوف شود. یک برنامه کارآمد کنترل آلاینده‌های شیمیایی از مبدأ و رهاسازی مواد شیمیایی خطرناک به سیستم جمع‌آوری فاضلاب که تصفیه آن‌ها دشوار است، می‌تواند به برنامه استفاده مجدد از آب برای مصارف خانگی کمک کند. همچنین با بالا بردن کیفیت پساب که از طریق تصفیه ثانویه بهبود یافته حاصل شده باشد،

می‌توان عملکرد AWTFها و کیفیت ATW مورد استفاده برای مصارف استفاده مجدد را بهبود بخشید. در نهایت، برای غلبه بر ترس عموم در برابر استفاده آب بازیافتی برای مصارف خانگی، استفاده از حائل محیط زیستی (مثل آب زیرزمینی یا مخزن آب سطحی) در پروژه‌های IPR می‌تواند عامل مؤثری برای پیشبرد اهداف استفاده مجدد از آب برای مصارف خانگی در ایران باشد. استفاده از تغذیه آب‌های زیرزمینی می‌تواند در بسیاری از مناطق

[1] Big Spring

شهری ایران کاربرد عملی‌تر داشته باشد. در سیستم‌های DPR، استفاده از حائل محیط زیستی ضروری نیست و فقط در زمانی که به آن نیاز باشد، می‌توان از حائل آب ذخیره شده مهندسی استفاده کرد. پیشبرد این راه و چالش‌های مربوط به‌کارگیری استفاده مجدد آب برای مصارف خانگی، از جمله استفاده از وسائل ارتباط جمعی در ارتقای دانش مردم، درمقاله سوم (بخش سوم) مورد بحث قرار گرفته‌اند.

## ۸- قدردانی

این مقاله، بخشی از سری مقالات با موضوع کاربرد بالقوه استفاده مجدد از آب برای مصارف خانگی در ایران است که برای اولین بار در مجله آب و فاضلاب چاپ می‌شود. نویسندگان از زحمات و همکاری آقای مهندس فربد خاتمی در تهیه این مقاله کمال تشکر را دارند. نویسندگان از هیئت تحریریه مجله آب و فاضلاب به‌ویژه آقای دکتر احمد ابریشم‌چی و آقای دکتر عباس افشار به پاس بررسی مقاله، راهنمایی و هدایت‌شان تشکر می‌کنند. از مدیر اجرایی مجله سرکار خانم موسوی و همکاران به پاس زحمات و کمک‌های بی‌دریغشان در مقدور ساختن چاپ این مقالات کمال تشکر و قدردانی به‌عمل می‌آید.

## References

APAI. 2015. *Direct potable reuse resource document.* Report Prepared for the Texas Water Development Board by Alan Plummer Associates, Inc., Fort Worth, TX.

Asano, T., Burton, F. L., Leverenz, H., Tsuchihashi, R. & Tchobanoglous, G. 2007. *Water reuse: Issues, technologies, and applications*. New York: McGraw-Hill.

Brandhuber, P. 2016. Surrogates and log reduction credits for pathogens. in Mosher, J.J., Varatanian, G.M. & Tchobanoglous, G. (Eds.), *Potable reuse research compilation: Synthesis of findings.* Water Environment and Research Foundation, Alexandria, VA.

du Pisani, P.L. 2005. Direct reclamation of potable water at Windhoek's Goreangab Reclamation Plant. In: S.J. Khan, M.H. Muston, & A.I. Schafer (Eds.), *Integrated concepts in water recycling.* University of Wollongong, Wollongong, Australia, pp. 193-202.

Gerringer, F. W., Venezia, T., Pecson, B., Trusselll, S.R. & Trusselll, R.R. 2015. Demonstrating the compliance of direct potable reuse trains with public health criteria. *Proceedings of California Annual Reuse Conference*, Los Angeles, CA.

Drewes, J. E. 2002. Water reclamation leading to indirect potable reuse in the U.S.A. – status, issues, and public perception. *Proceedings of Sustainable Development of Water Resources Pluralizing Technology*, Seoul, Korea.

Kayhanian M. & Tchobanoglous, G. 2016. Water reuse in Iran with emphasis on potable reuse. *Scientia Iranica*, 23(4), 1594-1617.

Linden, K., Salveson, A. & Thurston, J. 2012. *Innovative treatment technologies for reclaimed water*, WRRF-02-009, WateReuse Research Foundation, Alexandria, VA.

Mosher, J. J., Vartanian, G.M. & Tchobanoglous, G. 2016. *Potable reuse research compilation: Synthesis of findings.* Water Environment and Research Foundation, Alexandria, VA.

NWRI. 2013. *Examining the criteria for direct potable reuse, recommendations of an NWRI independent advisory panel.* WateReuse Research Foundation, Alexandria, VA.

Olivieri, A.W., Crook, J. Anderson, M.A., Bull, R.J., Drewes, J.E. Haas, C.N. 2016. *Expert panel final report: Evaluation of the feasibility of developing uniform water recycling criteria for direct potable reuse.* Report

Prepared by the National Water Research Institute for the State Water Resources Control Board, Sacramento, CA.

Plumlee, M.H., Lopez-Mesas, M., Heidlberger, A., Ishida, K.P. & Reinhard, M. 2008. N- nitrosodimethylamine (NDAM) removal by reverse osmosis UV treatment and analysis via L-MS/MS. *Water Research*, 42(1-2), 374-55.

Salveson, A. Rauch-Williams, T. Dickenson, E. Drewes, J. Drury, D. McAvoy, D. & Snyder, S. 2012. *Trace organic compound indicator removal during conventional wastewater treatment.* Water Environment Research Foundation, Alexandria, VA.

Salveson, A. Salveson, M., Mackey, E. & Flynn, M. 2014. *Application of risk reduction principles to direct potable reuse*, WateReuse Research Foundation, Alexandria, VA.

Salveson, A., Steinle-Darling, E., Trusselll, S., Trusselll, B. & McPherson, L. 2016. *Guidelines for engineered storage for direct potable reuse.* WateReuse Research Foundation: Alexandria, VA.

Schimmoller, L. 2016. Comparing advanced treatment approaches for a large-scale potable reuse project in Southeastern Virginia. *Proceeding of WEFTEC*, New Orleans, LA, September 26.

Tchobanoglous, G., Burton, F.L. & Stensel, H. D. 2003. *Wastewater engineering: Treatment and reuse*, 4th Ed., Metcalf and Eddy, Inc., McGraw-Hill Book Company, New York.

Tchobanoglous, G., Leverenz, H., Nellor, M. H. & Crook, J. 2011. *Direct potable reuse: A path forward*, WateReuse Research Foundation, Alexandria, VA.

Tchobanoglous, G., Stensel, H. D., Tsuchihashi, R. & Burton, F. L. 2014. *Wastewater engineering: Treatment and resource recovery*, 5th Ed., Metcalf & Eddy/AECOM, McGraw-Hill, New York.

Tchobanoglous, G., Cotruvo, J., Crook, E., McDonald, A., Olivieri, A., Salveson, R.S. & Trusselll, R. R. 2015. *Framework for direct potable reuse*, WateReuse Research Foundation, Alexandria, V.A.

Trusselll, R. R., Salveson, A., Snyder, S. A., Trusselll, R. S., Gerrity, D. & Pecson, B. M. 2015. *Equivalency of advanced treatment trains for potable reuse*, WateReuse Research Foundation, Alexandria, VA.

USEPA. 1990. *Guidance manual for compliance with the filtration and disinfection requirements for public water systems using surface water sources*, Prepared by Malcolm Pirnie, Inc. and HDR Engineering, Inc., United States Environmental Protection Agency, Washington, D.C.

USEPA. 1998. *Stage 1 disinfectant and disinfection byproduct rule, 63 CFR 69,390*, Federal Register. United States Environmental Protection Agency, Washington, D.C.

USEPA. 2006. *Ultraviolet disinfection guidance manual for the final long term 2 enhanced surface water treatment rule*, Office of Water, United States Environmental Protection Agency, Washington, D.C.

USEPA. 2012. *Guidelines for water reuse*, United States Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, Washington, D.C.

USEPA. 2017. *Potable reuse compendium*, United States Environmental Protection Agency, Office of Water, Washington, D.C.

## Appendix

## پیوست

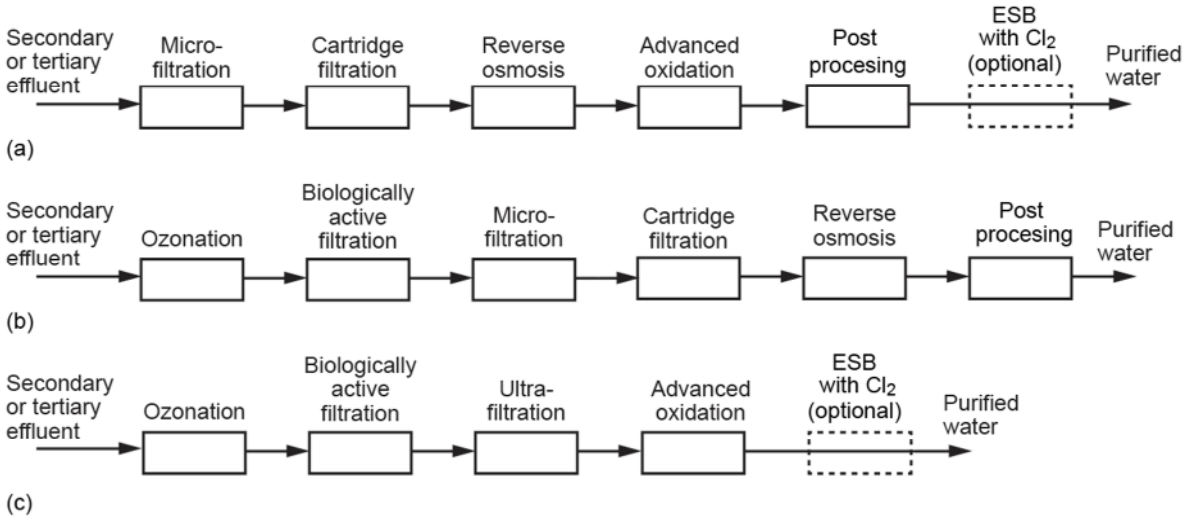



**Fig. 1.** Examples of three successfully implemented treatment trains used in AWTFs for producing ATW: (a) RO based without ozonation and with ESB; (b) RO based without ESB and with ozonation and BAF; and (c) Non-RO based with ozonation, BAF, and ESB. (Source: Adapted from Tchobanoglous et al. 2015).

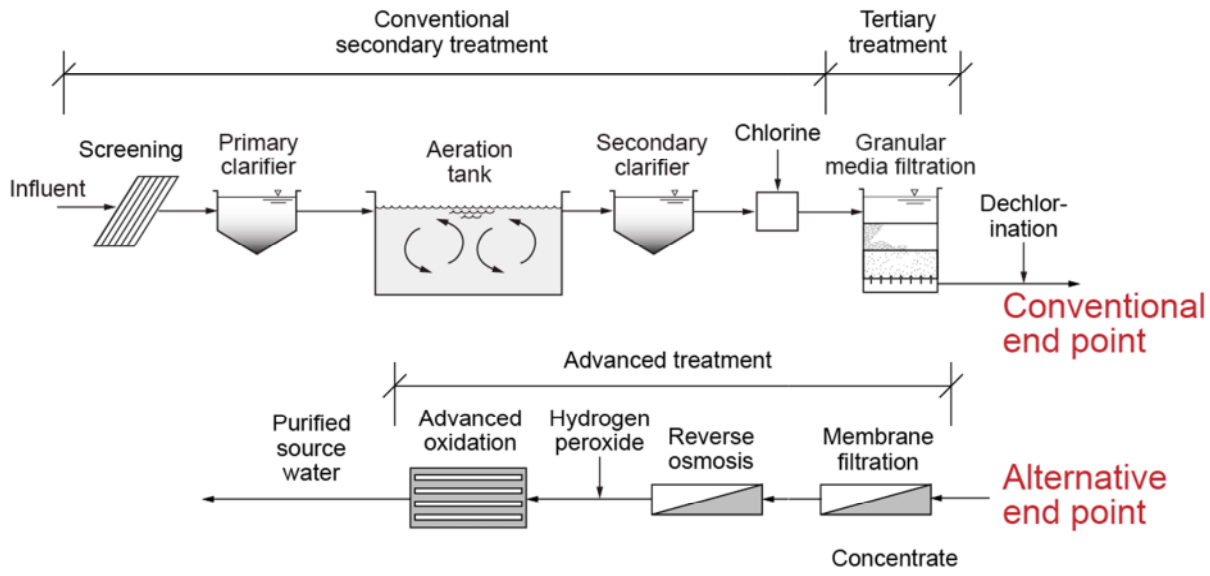
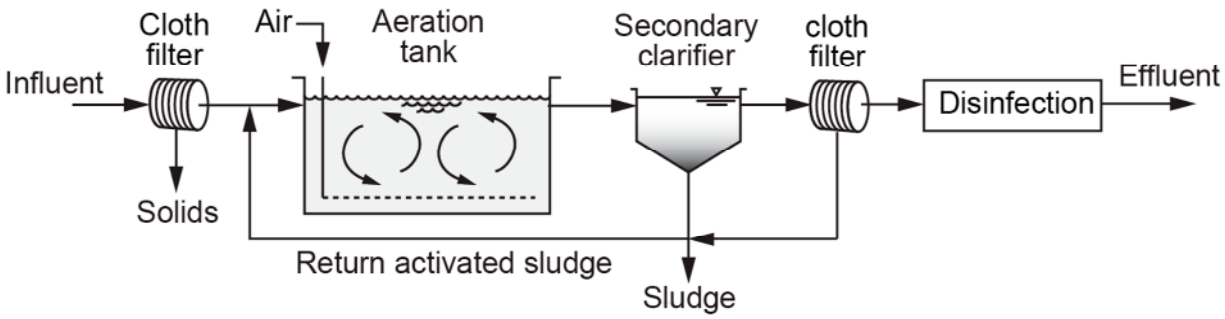
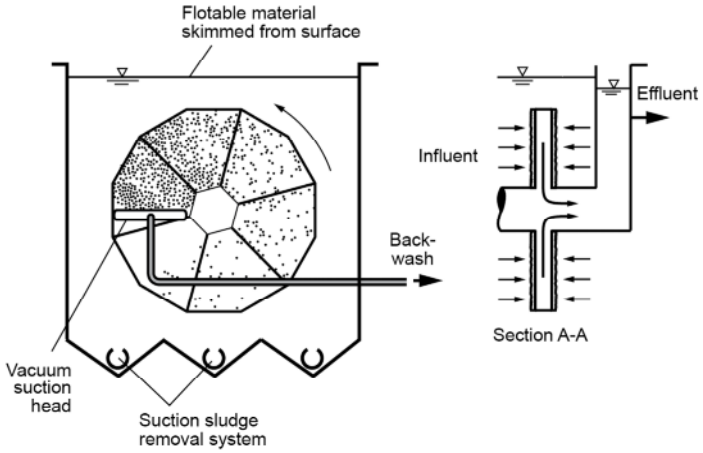
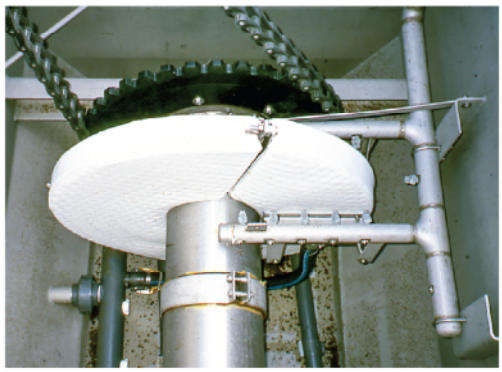



**Fig. 2**. Generalized secondary wastewater treatment process treatment train with conventional and alternative end points for the treated effluent (a) conventional discharge to the environment and (b) as an influent source water for advanced water treatment for reuse applications (Tchobanoglous et al., 2011)




(a)



(d) (c) (b)

**Fig. 3**. Use of cloth filters in wastewater treatment:(a) treatment process flow diagram illustrating the use of cloth filter as a replacement for primary sedimentation and for effluent filtration, (b) schematic of cloth filter with vacuum suction for the removal of accumulated solids, (c) cross section through filter disk, (d) view of single disk cloth filter. (Adapted in part from Tchobanoglous et al. 2014)

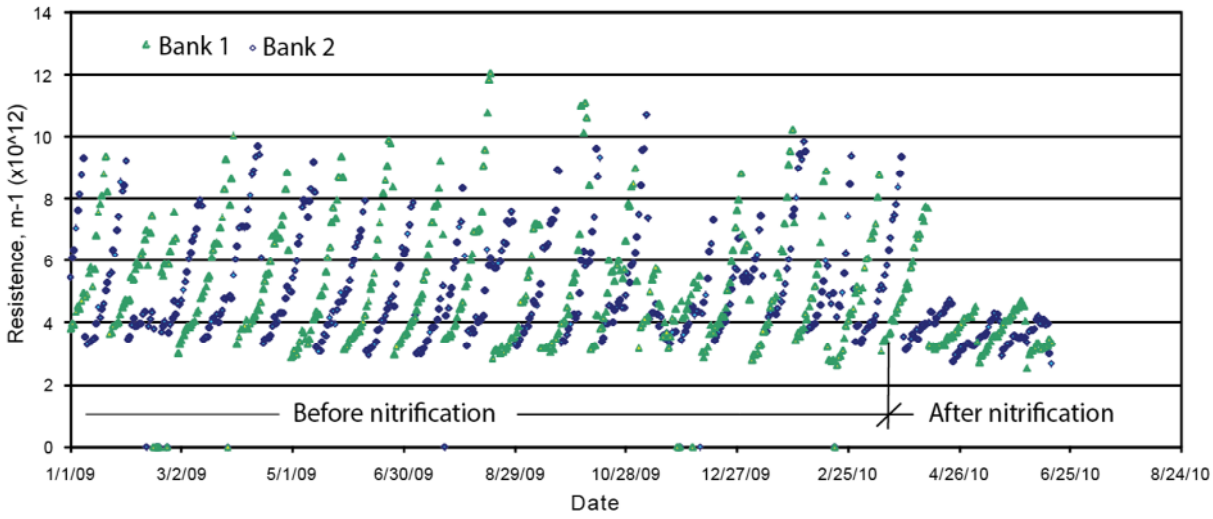



**Fig. 4.** Observed membrane fouling, measured as resistance (1/m), at OCWD GWRS before and after wastewater treatment plant switched to nitrification mode of operation March 2010 (Tchobanoglous et al., 2015).

**Table1.** Basis for the log reduction values used by the State of California (Adapted from Olivieri et al., 2016)

| Item | Enteric Virus | Giardia | Cryptosporidium |
|---|---|---|---|
| Untreated wastewater maximum concentration | $10^{5}$ virus/L | $10^{5}$ cysts/L | $10^{4}$ oocysts/L |
| Tolerable drinking water concentration (TDWC) | $2.2 \times 10^{-7}$ virus/L | $6.8 \times 10^{-6}$ cysts /L | $1.7 \times 10^{-6}$ oocysts /L |
| Ratio of TDWC to wastewater Concentration | $2.2 \times 10^{-12}$ | $6.8 \times 10^{-11}$ | $1.7 \times 10^{-10}$ |
| Required log reduction value | 12 | 10 | 10 |

**Table 2.** Examples of regulatory requirements from different sources for the log removal of pathogens and trace organic chemical constituents related to potable reuse projects (Adapted from Mosher et al., 2016, NWRI, 2013)

| Regulatory source | Regulatory requirements | |
|---|---|---|
| | Log removal requirement for pathogens | Trace organic chemical constituents limit based of TOC or COD concentration |
| California | Pathogen log reduction values of 12-log for viruses, 10-log for *Cryptosporidium,* and 10-log for *Giardia* are required from the raw wastewater to the finished water. Multiple barriers are required indirectly by limiting the maximum pathogen log reduction credit granted to any treatment step to 6-log, which is significantly below the total log reduction requirements, and by requiring RO and AOP. | California's IPR regulations for subsurface application (i.e., groundwater injection) require the use of RO and limit TOC to less than 0.5 mg/L for the complete use of advanced treated water with no dilution. |
| Florida | Florida has not established pathogens log removal requirement, but specifically state that treatment "...shall include processes which serve as multiple barriers for control of pathogens". | For IPR the limit for TOC is specified to 3 mg/L and specifically state that treatment "...shall include processes which serve as multiple barriers for control of organic compounds". |
| Texas | The Texas Commission on Environmental Quality (TCEQ) uses WWTP effluent as the starting point for pathogen reduction requirements for DPR projects (in contrast, California uses raw wastewater as the starting point for IPR projects). Consequently, for DPR trains, TCEQ has established minimum log reduction values of 8.0-log for viruses, 5.5-log for *Cryptosporidium*, and 6.0-log for *Giardia*. These values may be increased by the TCEQ based on site-specific WWTP effluent concentrations. | Texas has not established TOC limits for potable reuse projects. |
| Virginia | Virginia has not established pathogen log removal values for potable reuse projects. | Virginia's Occoquan Policy, which is the regulatory policy defining requirements for the long- standing IPR project of the Upper Occoquan Service Authority, dictates a COD limit of 10 mg/L (approximately 4 mg/L of TOC). |
| Singapore | Singapore has not established pathogens log removal values for potable reuse projects. | The TOC limit has been established at 0.1 mg/L for NEWater, which is used for IPR through surface water augmentation. |
| NWRI | AWTFs should provide 12-log reduction for enteric viruses, 10-log reduction of Cryptosporidium, and 9-log reduction of total coliform bacteria. | NWRI research study was only focused on pathogens log removal and hence no trace organic chemical removal limit was established. |

**Table3.** Range of log reduction values for various unit treatment process reported in the literature. The values in parentheses are approved for groundwater augmentation projects in California (Adapted from Olivieri et al. 2016, Brandhuber, 2016)

| Process | Pathogen log removal values | | | |
|---|---|---|---|---|
| | **Virus** | ***Cryptosporidium*** | ***Giardia*** | **Total coliform** |
| Secondary treatment (activated sludge) | 0-2 (1.9) | 0-2 (1.2) | 0-2 (0.8) | 0 |
| Secondary treatment (filtered and disinfected) | (5) | (0) | (0) | |
| Membrane bioreactor | 0 | 0-4 | 0-4 | 0-3 |
| Microfiltration (MF) or ultrafiltration (UF) | (0) | 4 (4) | 4 (4) | 0-3 |
| Ozone ($O_3$) | 4-5 | 3 | 3 | 3 |
| Nanofiltration | 0-2 | 0-2 | 0-2 | 2-4 |
| Reverse osmosis (RO) | (2) | (2) | (2) | 2-4 |
| Free chlorine disinfection following RO | (4) | (0) | (0) | 0-3 |
| Ultraviolet (UV) disinfection | 2-4 | 2-4 | 2-4 | 3-5 |
| Ultraviolet/hydrogen peroxide UV dose ~ >900 mJ/cm$^2$) | 4-6 (6) | 4-6 (6) | 4-6 (6) | |
| Advanced oxidation UV dose ~ >900 mJ/cm$^2$) | 4-6 (6) | 4-6 (6) | 4-6 (6) | |
| Subsurface application (6 months retention time) | (6) | (0) | (0) | |
| Surface water augmentation (6 months retention time) | (6) | (10) | (10) | |

**Table 4.** Typical range of effluent water quality after various levels of advanced water treatment (Adapted from Tchobanoglous et al., 2016)

| Constituent | Unit | Untreated wastewater | Range of effluent quality after indicated treatment | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | Conventional activated sludge with filtration | Treatment train in Figure 1c | Treatment train in Figure 1b | Treatment train in Figure 1a |
| TSS | mg/L | 100-389 | 2-8 | 1-2 | ≤1 | ≤1 |
| Turbidity | NTU | 80-150 | 1-10 | ≤1 | ≤0.1 | ≤0.1 |
| BOD | mg/L | 133-400 | <5- | ≤1 | ≤1 | ≤1 |
| COD | mg/L | 339-1016 | 30-70 | ≤10-30 | ≤2-30 | ≤2-30 |
| TOC | mg/L | 109-328 | 15-30 | 2-5 | 0.1-1 | 0.1-1 |
| $NH_3$-N | mg N/L | 14-41 | 1-6 | ≤1 | ≤1 | ≤1 |
| $NO_3$-N | mg N/L | 0-trace | 5-30 | 0.001 | ≤1 | ≤1 |
| $NO_2$-N | mg N/L | 0-trace | 0-trace | ≤0.001 | ≤0.001 | ≤0.001 |
| Total N | mg N/L | 23-69 | 80015-35 | ≤1 | ≤1 | ≤1 |
| Total P | mg P/L | 3.7-11 | <MRL2-6 | 2-6 | ≤0.5 | ≤0.5 |
| VOCs | µg/L | <100->400 | 10-40 | ≤1 | ≤1 | ≤1 |
| Fe and Mn | mg/L | 1-2.5 | 1-1.4 | ≤0.3 | ≤0.1 | ≤0.1 |
| Surfactants | mg/L | 4-10 | 0.5-1.5 | ≤0.5 | ≤0.1 | ≤0.1 |
| TDS | mg/L | 374-1121 | 374-1121 | 374-1121 | ≤5-40 | ≤5-40 |
| Household chemicals | µg/L | 10-50 | 5-30 | ≤0.1 | ≤0.1 | ≤0.1 |
| Total coliform | No./100 mL | $10^6$-$10^{10}$ | $10^3$-$10^5$ | 350 | <1 | <1 |
| Protozoan cysts and oocysts | No./100 mL | $10^1$-$10^3$ | 0-10 | ≤0.002 | ≤0.002 | ≤0.002 |
| Viruses | PFU/100 mL | $10^1$-$10^8$ | $10^1$-$10^4$ | ≤0.03 | ≤0.03 | ≤0.03 |

Note: Household chemicals include: fire retardant, personal care products, and prescription and non-prescription drugs; AOP = advance oxidation process; BAF = biologically active filtration; MF = microfiltration; $O_3$ = ozone; PFU = plaque forming unit; RO = reverse osmosis; UV = ultraviolet

**Table 5.** Pathogen log reduction credits achieved by treatment trains shown in Fig. 1a . (Adapted from Mosher et al., 2016)

| Pathogen | Log reduction for different treatment technology | | | | Total log reduction |
|---|---|---|---|---|---|
| | MF | RO | UV/AOP | ESB with $Cl_2$ | |
| Virus | 0 | 2 | 6 | 4 | 12 |
| *Crytosporidium* | 4 | 2 | 6 | 0 | 12 |
| Total Coliform | 3 | 2 | 6 | 4 | 15 |

**Table 6.** Pathogen log reduction credits achieved by treatment trains shown in Fig. 1b (Adapted from Mosher et al., 2016)

| Pathogen | Log reduction for different treatment technology | | | | | Total log reduction |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | $O_3$[a] | BAF | MF | RO | UV/AOP | |
| Virus | 4 | 0 | 0 | 2 | 6 | 12 |
| *Cryptosporidium* | 0 | 0 | 4 | 2 | 6 | 12 |
| Total Coliform[b] | 2-4 | 0 | 3 | 2 | 6 | >13 |

[a] Per the U.S. EPA Surface Water Treatment Rule, ozone provides 4-log virus inactivation at a CT of 1 mg/L-min at 10 °C.
[b] Actually demonstrated values (Gerringer et al., 2015).

**Table 7.** Pathogen log reduction credits achieved by treatment trains shown in Fig. 1c (Adapted from Mosher et al., 2016)

| Pathogen | Log reduction for different treatment technology | | | | | Total log reduction |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | $O_3$[a,b] | BAF | UF[c] | UV/AOP[d] | ESB with $Cl_2$[e] | 6. |
| Virus | 4 | 0 | 2 | 6 | 4 | 16 |
| *Cryptosporidium* | 0 | 0 | 4 | 6 | 0 | 10 |
| Total Coliform[f] | 2-4 | 0 | 3 | 6 | 4 | >15 |

[a] Per the U.S. EPA Surface Water Treatment Rule, ozone provides 4-log virus inactivation at a CT of 1 mg/L-min at 10 °C.
[b] Both chlorine (and ozone) likely will achieve higher log reduction values than shown if higher CTs are used.
[c] Two-log reduction of viruses has been assumed based on MS-2 phage challenge testing conducted by ultrafiltration (UF) module manufacturers under National Science Foundation (NSF) Environmental Technology Verification and California Title 22 Certification Programs.
[d] Six-log reduction of viruses and *Cryptosporidium* have been assumed for UV/AOP based on testing by UV manufacturers.
[e] Per the U.S. EPA Surface Water Treatment Rule, free chlorine provides 4-log virus inactivation at a CT of 6 mg/L-min at 10 °C.
[f] Actually demonstrated values (Gerringer et al. 2015).

**Table 8.** Concentration of elective trace constituent of effluent treated by different conventional and advanced treatment processes compared with their treatment criteria ((Adapted from Tchobanoglous et al., 2016)

| Trace constituent | Concentration (ng/L) | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Treatment criteria | MRL | Secondary Effluent | Advanced treatment technology | | | | | |
| | | | | $O_3$ Effluent | BAF effluent | UV Effluent | MF Filtrate | RO Permeate | UV/$H_2O_2$ effluent |
| Alcohol | 400 | 31 | 292 | <MRL | <MRL | <MRL | NT | <MRL | <MRL |
| Carbamazepine | 10,000 | 1 | 194 | <MRL | 25 | 1 | T | <MRL | <MRL |
| DEET | 200,000 | 6 | 45 | <MRL | <MRL | <MRL | NT | <MRL | <MRL |
| Estrone | 320 | 1 | <MRL | <MRL | <MRL | <MRL | NT | <MRL | <MRL |
| Meprobamate | 200,000 | 3 | 380 | 158 | 178 | 170 | NT | <MRL | <MRL |
| PFOA | 400 | 9 | 12 | 10 | 35 | 22 | NT | <MRL | <MRL |
| PFOS | 200 | 8 | <MRL | <MRL | <MRL | <MRL | NT | <MRL | <MRL |
| Primidone | 10,000 | 7 | 4,100 | 525 | 23 | 186 | NT | 7 | 75 |
| Sucralose | 150,000,000 | 77 | 24,800 | 17,200 | 19,700 | 21,700 | NT | <MRL | <MRL |
| TCEP | 5,000 | 77 | <MRL | <MRL | <MRL | <MRL | NT | <MRL | <MRL |
| Triclosan | 2,100,000 | 8 | 128 | <MRL | <MRL | 9 | NT | <MRL | <MRL |

Note: BAF = biologically active filtration; DEET = N,N-diethyl-meta-toluamide or diethyltoluamide; MF = microfiltration; MRL = method reporting limit; NT = not tested; PFOA = perfluorooctanic acid; PFSO = perfluorooctane sulfonate; RO = reverse osmosis; TCEP = tris (2-Carboxyethyl) phosphine) hypochloride; UV = ultraviolet.

**Table 9**. Description of major elements for an enhanced source control program in a potable reuse program (Adapted from Tchobanoglous et al., 2015)

| Element | Description |
|---|---|
| **Regulatory authority** | |
| Legal authority | Ensure that the source control program has sufficient legal authority to develop and control source control measures, including authority to oversight/inspection as well as plan and review new connection to the collection system. |
| Discharge permit | Ensure that industrial discharge permit and other control mechanisms can effectively regulate and reduce the discharge of COCs. |
| Enforcement | Ensure that the enforcement response program can identify and respond rapidly to COCs. |
| Alternative control programs | Consider alternative control mechanisms, such as BMPs or self-certification for zero discharge of pollutants for classes of industries or commercial businesses. |
| ***Monitoring and assessment of the wastewater collection system in service area (sewershed)*** | |
| Routine monitoring program | The influent to the WWTP and secondary or tertiary effluent to the AWTF are monitored routinely for regulated constituents and other COCs that may be discharged into the collection system service area. |
| Constituent prioritization program | COCs are identified and short-listed using results from the routine monitoring. It may be necessary to develop separate monitoring program for the constituents of greatest concern. |
| Evaluation of technically based local limits | Regulated constituents and other COCs are evaluated for their potential to cause interference, pass through an AWTF, or affect human and environmental health and safety. For the development of local limits, consider including a broader spectrum of COCs such as (1) regulated and non-regulated constituents that are relevant for PR (e.g., drinking water contaminants) or (2) CESs. |
| ***Source investigation*** | |
| Industrial and commercial business inventory | Develop and maintain a frequently updated, comprehensive inventory of industries and businesses that may use products for chemicals containing COCs or generate intermediate COCs. For agencies with large service areas, multiple communities, or industrial flows coming from other wastewater entities, it may be desirable to link the inventory to a service area mapping tool such as a geographic information system (GIS) network. |
| WWTP-AWTF joint response plan | The response plan includes a flow chart showing key responsibilities and decision points to either investigate or mitigate COCs being discharged into the collection system. |
| ***Maintenance of current inventory of chemicals and constituents*** | |
| Chemical inventory program | Develop and maintain a database of the chemicals stored and inventory volumes used annually by industrial and commercial producers and manufacturers in the service area. Potential sources of this type of information include the industries themselves or local fire department. |
| Waste hauler monitoring program | A program is needed to monitor and track discharges of septic wastes or other wastewater delivered to the collection system by truck. Haulers should be permitted and required to provide chemical inventory and discharge information to the wastewater treatment authority before being allowed to discharge. Consideration should be given to requiring waste haulers to deliver to a different treatment facility. |
| Chemical fact sheet | Maintain a database of fact sheets for CECs encountered within the service area. |
| ***Public outreach program*** | |
| Industrial discharges | Provide: (1) public outreach information on PR to industries, (2) source control practices, and (3) compliance assistance and permit assistance to support the PR program.<br>Develop a program that encourages commercial and industrial discharges to be partners in protecting the sewershed, such as environmental stewardship programs or award programs for consistent compliance<br>Assist and encourage industries and business that use chemicals that contain COCs to identify source control options, such as chemical substitution. |
| Service area pollution prevention partnership program | Develop a cooperative program with cities, counties, or other jurisdictions within the WWTP service area to disseminate information to the public about COCs and acceptable discharges to the sewer. |

(Cont'd)

| Element | Description |
|---|---|
| Public education and outreach program | Provide outreach to the public regarding the proper disposal of pharmaceuticals and household products containing chemicals that may be difficult to treat (e.g., what to flush and not flush). Consider developing a household hazardous waste collection program. |
| Education program | Develop school educational programs for grades 1 through 12 that address source control issues related to portable reuse. |
| ***Response plan for identified constituents*** | |
| Interagency collaboration | The success of a source control program will depend on strong interagency cooperation and responsiveness between the WWTP and AWTF. For PR project that receive industrial waste from outside the service area, ensure that the agreement to accept the waste is consistent with source control program requirements. For PR projects where the agency that administers the source control program is not the agency that operates the AWTF, consider entering into a memorandum of understanding or other contractual agreement so that appropriate source control actions can be taken. If necessary, to protect water quality. |
| Response to water quality deviations | Develop an action plan for responding to water quality deviations. For example, if a specific chemical constituent is detected at the AWTF, review operation and calibration records for online meters and any analytical methods that may be involved. If a problem is not identified, then notify the WWTP to initiate a review and inspection of the WWTP for possible sources of the constituent. If no source is found at the WWTP, then initiate a wastewater collection system sampling. If a problem is identified, the action plan should include procedure for the operations staff to notify the source control staff to respond to and correct the issue and if necessary, procedures for bypassing or shutting down the facility. |

AWTF = advanced water treatment facility; BMPs = best management practices; CEC = constituent of emerging concern; COCs = constituent of concerns; PR = potable reuse; WWTP = wastewater treatment plant; GIS = geographic information system

**Table 10.** Summary of constituents' removed by different treatment processes (Adapted from Tchobanoglous et al., 2014)

| Treatment process | Constituents Removed |
|---|---|
| Preliminary | Removal of materials from wastewater (such as rags, sticks, floatables, grit, and grease) that may cause maintenance or operational, processes, and ancillary systems. |
| Primary | Removal of portion of suspended solids and organic matter from wastewater. |
| Advanced primary | Enhanced removal of suspended solids and organic matter from wastewater, typically accomplished by chemical addition or filtration. |
| Secondary | Enhanced removal of suspended solids matter (in solution or suspension) and suspended solids. From the regulations point of view, secondary treatment is defined as meeting minimum standards for biochemical oxygen demand and total suspended solids and pH limits in effluents discharged from municipal wastewater treatment plants. In most situations, disinfection is included as part of secondary treatment |
| Secondary with nutrient removal | Removal of biodegradable organics, suspended solids and nutrients (e.g. nitrogen, phosphorous or both) |
| Advanced secondary (Tertiary) | Removal of residual suspended solids (after conventional secondary) usually by granular media filtration or micro-screens. Disinfection is often included in advanced secondary or tertiary treatment, although it can be applied after any level of treatment prior to discharge. In some cases, nutrient removal also is included under this definition. |

**Table 11.** Measures that could be employed to improve the treatment performance and enhance the reliability of existing and proposed WWTPs in Iran (Tchobanoglous et al., 2015)

| Measure | Value of each measure | Comments |
|---|---|---|
| Influent flowrate and load equalization | Efficiency, water quality, reliability | Enhance biological treatment by: (1) reducing or eliminating shock loadings, (2) diluting inhibiting substances, (3) improving performance of overall biological treatment processes through improved consistency in solids, organics, and nutrient loading.<br>Biological treatment reactor sizes can be reduced with flow equalization.<br>Blower aeration and return flow rates and process controls are stabilized—requiring only minor adjustments—with flow equalization.<br>Surface area requirements for secondary effluent filtration are reduced and filter performance is improved with more consistent filtered water quality and uniform filter-backwash cycles. |
| Enhanced pretreatment | Efficiency, reliability | Removal of inert constituents that can improve treatment performance (e.g., rags and plastic materials).<br>Alteration of wastewater particle size distribution, which will enhance biological treatment kinetics |
| Elimination (or equalization) of untreated return flows | Water quality, reliability | Return flows are generated from solids thickening and dewatering process.<br>All solids handling processes involve significant amounts of polymer to enhance dewatering process; some polymers have been identified as precursors to the formation of some disinfection byproduct (DBPs), such as N-nitrosodimethylamine (NDMA). |
| Operational mode for biological treatment process | Water quality, reliability | To enhance performance of AWTF, biological treatment should be operated in nitrification/denitrification mode.<br>Longer mean cell residence times can be used to remove nitrates and enhance removal of trace organic chemicals and other specific constituents, such as metals. |
| Improved process monitoring and control | Water quality, reliability | Enhance monitoring of individual processes to improve performance.<br>Specific studies of new process monitoring equipment and techniques<br>Facility should evaluate online meters for maintaining solids inventory, in addition to monitoring effluent water quality with turbidity and conductivity monitors.<br>A meter maintenance procedure must be in place, with dedicated staff to ensure that meters are calibrated properly and checked periodically with laboratory measurements and action points are identified (a flow chart of responsibility is also necessary). |

**Table 12**. Typical range of wastewater effluent quality produced from selective treatment processes (Adapted from Tchobanoglous et al., 2015)

| Constituent/water quality parameter | Unit | Range of effluent quality from selected treatment processes | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | CAS | CAS with filtration | CAS with BNR | CAS with BNR and filtration | Membrane bioreactor |
| Total suspended solids | mg/L | 5-25 | 2-8 | 5-20 | 1-4 | <1-5 |
| Turbidity | NTU | 2-15 | 1-5 | 1-5 | 1-5 | <1-2 |
| Biochemical oxygen demand | mg/L | 5-25 | <5-20 | 5-15 | 1-5 | <1-5 |
| Chemical oxygen demand | mg/L | 4—80 | 30-70 | 20-40 | 20-30 | <10-30 |
| Total organic carbon | mg N/L | 20-40 | 15-30 | 10-20 | 1-5 | <0.5-5 |
| Ammonia nitrogen | mg N/L | 1-10 | 1-6 | 1-3 | 1-2 | <1-5 |
| Nitrate nitrogen | mg N/L | 5-30 | 5-30 | <2-8 | 1-8 | <8 |
| Nitrite nitrogen | mg N/L | 0-trace | 0-trace | 0-trace | 0.001-0.1 | 0-trace |
| Total nitrogen | mg N/L | 15-35 | 15-35 | 3-8 | 2-5 | <10 |
| Total phosphorous | mg P/L | 3-10 | 3-8 | 1-2 | <1 | 0.3-5 |
| Volatile organic compounds | µg/L | 10-40 | 10-40 | 10-20 | 10-20 | 10-20 |
| Iron and manganese | mg/L | 1-15 | 1-1.4 | 1-1.5 | 1-1.5 | Trace |
| Surfactants | mg/L | 0.5-2 | 0.5-1.5 | 0.1-1 | 0.1-1 | 0.1-0.5 |
| Total dissolved solids | mg/L | 374-1121 | 374-1121 | 374-1121 | 374-1121 | 374-1121 |
| Trace constituents | µg/L | 5-40 | | | | |
| Total coliform | No./100 mL | $10^4$-$10^5$ | $10^3$-$10^5$ | $10^4$-$10^5$ | $10^4$-$10^5$ | <100 |
| Protozoan oocysts | No./100 mL | $10^1$-$10^2$ | 0-10 | 0-10 | 0-10 | 0-10 |
| Viruses | PFU/100 mL | $10^1$-$10^4$ | $10^1$-$10^3$ | $10^1$-$10^3$ | $10^1$-$10^3$ | $10^0$-$10^3$ |

CAS = Conventional Activated Sludge; BNR = Biological Nitrification Removal

**Table 13.** Key requirements for groundwater augmentation with various levels of treated wastewater in California

| Item | Description |
|---|---|
| **Recharge method and the level of treatment requirements** | |
| ***Recharge application method:*** | ***Required treatment level:*** |
| Surface spreading with advanced wastewater treatment | Oxidation[a], filtration, disinfection, soil aquifer treatment |
| Surface spreading with | Oxidation, reverse osmosis, advance oxidation, soil aquifer treatment |
| Injection with advanced treated water | Oxidation, reverse osmosis, advance oxidation process |
| **Water quality requirements and the level of contaminants removal required** | |
| **Water quality requirements:** | **Required contaminant removal:** |
| Overall pathogen reduction[b] | ≥ 12-log virus,<br>≥10-log *Giardia* cyst,<br>≥10-log *Cryptosporidium* oocyst |
| Drinking water MCLs | All except nitrogen |
| Drinking water action levels | Lead and copper |
| Total nitrogen | ≤ 10 mg/L, nitrogen limit can be met in recycled water or combination with other diluent water |
| Total organic carbon in mg/L | TOC ≤ 0.5/Recycled water contribution (RWC) |
| **Other conditions and requirements:** | |
| Raw water quality | Industrial pretreatment and source control program |
| Virus reduction | 1-log credit per month of subsurface retention |
| *Giardia* and *Cryptosporidium* reduction | 10-log each for disinfected tertiary effluent with at least 6 months subsurface retention |

[a]The term "oxidation" is defined as a wastewater in which the organic matter has been stabilized, is non-putrescible, and contains dissolved oxygen (i.e., essentially effluent from secondary treatment)
[b]The overall pathogen treatment requirement can be met either by advanced water treatment or a combination of wastewater treatment and treatment achieved in the subsurface as a function of the retention time. Minimum treatment requirements that must be met with treatment processes before spreading can occur are also specified.
Note: RWC = recycled water contribution