بررسی راندمان کانی گارنت در صافی سه لایه‌ای در حذف کدورت و موجودات بیولوژیکی در تصفیه‌خانه آب اصفهان

محسن معمارزاده[1] پیام نجفی[2] مجید افیونی[3]

(دریافت ۸۷/۱۰/۱۶ پذیرش ۸۸/۲/۱۷)

چکیده

به‌منظور دستیابی به آب شرب با کیفیت بالا، استفاده از فناوری‌ها و دانش روز دنیا از جمله استفاده از صافی‌های سه لایه‌ای در تصفیه‌خانه‌های آب امری ضروری است. این مطالعه نتایج حاصل از یک تحقیق آزمایشگاهی در مقیاس پایلوت بود که با هدف بررسی عملکرد استفاده از کانی گارنت در صافی چند بستری و مقایسه آن با صافی شاهد دو لایه‌ای در حذف کدورت و برخی موجودات بیولوژیکی در تصفیه‌خانه آب اصفهان انجام شد. کلیه آزمایش‌ها به‌روش استاندارد انجام شد و نتایج به‌دست آمده با استفاده از آزمون‌های آماری، مورد بررسی قرار گرفت و مشخص شد که اختلاف معنی‌داری در نتایج به‌دست آمده به‌شرح زیر وجود دارد: کارایی حذف کدورت ، دیاتومه، جلبک، روتیفر و نماتد در شرایط لایه‌بندی مطلوب و استفاده از سیستم شستشوی معکوس با استفاده از آب و هوا در صافی پایلوت به‌ترتیب ۹۲/٤، ۹۷/۹۷،٦/۸، ۹٤/٤و ۹٦/٥ درصد و صافی شاهد دو لایه‌ای به‌ترتیب ۸۸/۸، ۸۵/۲، ۸٦/۷، ۸۰/٥ و۷۲/۱ درصد بود که نشان دهنده برتری کارایی استفاده از صافی سه لایه‌ای نسبت به صافی دو لایه‌ای در حذف کدورت، دیاتومه، جلبک، روتیفر و نماتد است. لذا لازم است که شرکتهای آب و فاضلاب، مهندسان مشاور و سازندگان تأسیسات تصفیه‌خانه‌های آب توجه کافی به استفاده از این گونه صافی‌ها جهت تولید آب با کیفیت بهتر را مورد نظر قرار دهند.

واژه‌های کلیدی: صافی سه لایه‌ای، گارنت، کدورت، موجودات بیولوژیکی، شستشوی معکوس، تصفیه‌خانه آب اصفهان

Efficiency of Garnet Mineral Used in Three-layer Filters to Remove Turbidity and Biological Organisms in Isfahan Water Treatment Plant

Mohsen Memarzadeh [1] Payam Najafi [2] Majid Afuni [3]

(Received Jan. 6, 2009 Accepted May 7, 2009)

Abstract

It is essential to use new technologies in water treatment plants to reach high quality potable water. The three-layer filter is one such new technology. In this paper, we will present the results of a laboratory investigation on the pilot scale to evaluate the performance of mineral garnet in multi-layer filters and to compare it with the two-layer blank filter in the removal of turbidity and biological organisms. All experiments were performed using standard methods and the results were evaluated by statistical tests. In the good padding situation and when using water and air backwash system, the removal efficiencies obtained by the multi-layered filter for turbidity, diatome, algae, and nematode were 92.4, 97.8, 97.6, 94.4, and 96.5%, respectively. The removal efficiencies achieved by the two-layer blank filter were 88.8, 85.2, 86.7, 80.5, and 72.1%, respectively. Water and wastewater companies, consultants and manufacturers are recommended to consider the multi-media filters as a preferrable alternative for designing new water treatment plants or for renewing existing plants.

Keywords: Three-layer filters, Garnet, Turbidity, Biological Organisms, Backwash, Isfahan Water Treatment Plant

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی کشاورزی- خاکشناسی، دانشگاه آزاد اسلامی، کارشناس کنترل کیفی تصفیه خانه آب اصفهان (نویسنده مسئول)
(۳۱۱) ۲۷۳۰۳۰۹ mhsn_memarzadeh@yahoo.com
۲- استادیار، دانشکده کشاورزی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد خوراسگان
۳- استاد دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان

1. MSc. of Soil Sciences, Azad Uni., Branch of Khorasgan, and Quality Control Expert in Isfahan Water Treatment Plant, Isfahan (Corresponding Author) (+98 311) 2730309, mhsn_memarzadeh@yahoo.com
2. Assist. Prof., Dept. of Agriculture, Azad Uni., Branch of Khorasgan, Isfahan
3. Prof., Dept. of Agriculture, Isfahan Uni. of Sciences and Technology, Isfahan

۱- مقدمه

امروزه صافی‌های ماسه‌ای تند تک لایه، به‌دلیل ضعف کارایی و انسداد سریع صافی، جای خود را به صافی‌های دولایه و سه لایه داده‌اند. ماسه سیلیسی به‌علت دوام زیاد و قیمت کم همیشه به‌عنوان یک لایه از بستر صافی دو لایه مطرح بوده است [۱].

از جمله معایب صافی‌های تک لایه می‌توان به رشد ارگانیسم‌ها درون صافی اشاره کرد که نشان دهنده ساختار یک لایه فعال بیولوژی است که به قشر لزج روی صافی موسوم است و در طی بهره‌برداری از یک صافی شنی کند به‌وجود می‌آید و باعث ایجاد افت فشار در صافی تک بستری می‌شود [۲]. یکی دیگر از معایب این نوع صافی‌ها این است که بستر پس از شستشو، به لایه‌هایی تقسیم می‌شود که لایه‌های بالایی را ماسه‌های ریز دانه و لایه‌های پایینی را ماسه‌های درشت دانه تشکیل می‌دهند. این مشکل در دانه‌بندی ذرات داخل بستر صافی به‌روشهای مختلف قابل حل است. یکی از روشها، استفاده از صافی‌های دو لایه و سه لایه است. در این نوع صافی‌ها از بالا به پایین اندازه دانه‌ها کوچک‌تر می‌شود و وزن مخصوصشان افزایش می‌یابد. در نتیجه در لایه‌های بالایی تجمع ذرات، یکسان‌تر انجام می‌گردد و سبب می‌شود که بعد از هر بار شستشوی صافی، بستر صافی حالت قبلی خود را حفظ کند. به این طریق از کل عمق صافی بهره‌برداری می‌شود و حجم بیشتری از مواد معلق در صافی به‌جا می‌ماند و در نتیجه حجم بیشتری از آب در بین دو شستشو، تصفیه می‌شود [۳].

کیفیت آب فیلتر شده بستگی به دو عامل نوع بستر و اندازه بستر دارد. اگر دانسیته ذرات تشکیل دهنده صافی با هم متفاوت باشند، ذرات لایه‌بندی می‌شوند و توده چند لایه‌ای در محیط صافی به‌وجود می آید که منجر به افزایش عمق و کارایی و به حداقل رساندن عمل شستشوی معکوس[1] می‌شود. استفاده از گارنت در صافی‌های چند بستری این امتیاز را دارد که زمان مورد نیاز برای شستشوی معکوس کمتر می‌شود. همچنین گارنت به‌علت دارا بودن سختی و پایداری در مقابل فرسایش، بسیار مقاوم است. از گارنت در فرایند تصفیه آب دارای استاندارد AWWA و NSF نیز استفاده می‌شود [۴].

فیلترهای معمولی که عموماً برای تهیه آب آشامیدنی به‌کار می‌روند شامل شن، سیلیس، گارنت و آنتراسیت می‌باشند [۵ و۶]. اگر دانسیته ذرات تشکیل دهنده صافی با هم متفاوت باشند، ذرات لایه‌بندی می‌شوند و توده چند لایه‌ای در محیط صافی به‌وجود می‌آید که منجر به افزایش عمق و کارایی و به حداقل رساندن عمل شستشوی معکوس می‌گردد.

[1] Backwash

به‌طور خلاصه در صافی با بستر دو یا سه گانه دو امتیاز وجود دارد که عبارت‌اند از : ۱- افزایش کاربری نسبت به بسترهای تک لایه‌ای ۲- تولید آب باکیفیت بهتر نسبت به بسترهای تک لایه‌ای.

تحقیقات نشان می‌دهد راندمان حذف کدورت و موجودات بیولوژیکی از آب خروجی به فیلترهای چند لایه‌ای نسبت به آب خروجی به صافی‌های دو لایه‌ای یا تک لایه‌ای بیشتر است. راندمان صافی کند ماسه‌ای در حذف کدورت، مواد آلی و کلیفرم‌ها مورد مطالعه قرار گرفته و مشخص شده است که صافی کند ماسه‌ای قادر است کدورت را به کمتر از۱ واحد بر حسب NTU کاهش دهد. همچنین توانایی حذف مواد آلی کمتر از ۵۰ میلی‌گرم در لیتر را به میزان ۱۰۰درصد دارا است. علاوه بر آن، این صافی می‌تواند بیش از ۹۵ تا ۹۹ درصد کلیفرم‌های آب خام را حذف نماید [۲]. از معایب صافی‌های تک لایه‌ای این است که با کاهش ارتفاع، کارایی صافی کاهش می‌یابد [۲]. با استفاده از فیلترهای دو و چند بستری، صاف کردن مستقیم آب با کدورت کم بدون عملیات ته‌نشینی امکان‌پذیر است. در این فیلترها معمولاً مواد شیمیایی منعقد کننده در آب ورودی به صافی اضافه می‌شوند و لخته‌های ریز و محکم تولید می‌کنند و از این طریق حذف کدورت افزایش می‌یابد [۷]. استفاده از تکنولوژی صافی‌سازی با استفاده از فیلترهای چند لایه‌ای برای تصفیه آب و فاضلاب توصیه شده است [۸]. همچنین حذف باکتری *ژیاردیا*[2] و *کریپتوسپوریدیم*[3] با استفاده از صافی‌های سه لایه‌ای انجام می‌شود [۹].

بلامی و همکاران[4] در سال ۱۹۸۵ نتیجه گرفتند که کارایی حذف میکربی با افزایش سرعت صافی‌سازی، کاهش دمای آب، کاهش ضخامت بستر و افزایش اندازه مؤثر، کاهش می‌یابد [۱۰]. تمامی آزمایش‌ها برتری صافی سه لایه نسبت به تک لایه از جهت کیفیت آب خروجی و زمان کارکرد را نشان می‌دهند. در منابع مختلف تأکید زیادی بر حذف *ژیاردیا* و *کریپتوسپوریدیم* شده است. سرعت فیلتراسیون در حذف *ژیاردیا* و *کریپتوسپوریدیم* در صافی‌های با بار سطحی زیاد[5] نظیر صافی‌های دو لایه‌ای و چند لایه‌ای بیش از ۴ برابر صافی‌های شنی معمولی است. در این صافی‌ها، بستر صافی بیش از یک لایه دارد [۱۱].

هدف از انجام این تحقیق بررسی راندمان حذف میزان کدورت بر حسب واحد بین المللی NTU و درصد حذف تعداد میکروارگانیسم‌ها درفیلتر سه لایه‌ای نسبت به فیلترهای دو لایه‌ای تصفیه‌خانه آب اصفهان بود. در این تحقیق ابتدا حذف کدورت مورد

[2] *Giardia*
[3] *Cryptosporidium*
[4] Bellamy et al.
[5] High Rate Filter

توجه قرار گرفت و سپس در هر مرحله در صورت افزایش راندمان حذف کدورت توسط فیلتر سه لایه‌ای، حذف میکروارگانیسم‌ها نیز بررسی شد.

۱-۱-گارنت

نام گارنت[1] (گرونا و یا نارسنگ) از واژه گرونا از کلمه لاتین گراناتوس[2] به معنی شبیه به دانه گرفته شده است. زیرا دانه‌های سرخ رنگ آن شبیه میوه انار است. فرمول عمومی $A_3B_2(SiO_4)_3$ است که در آن A معرف کاتیون‌های دوظرفیتی مثل $Fe^{2+},Mg^{2+},Ca^{2+},Mn^{2+}$ و B معرف کاتیون‌های سه ظرفیتی مانند AL^{3+},Fe^{3+},Cr^{3+} است [۱۲، ۱۳ و ۱۴]. گارنت دارای ساختمان چهار وجهی منفرد است و نسبت Si:O در آن ۱:۴ است. از نظر رده بندی در گروه نئوسیلیکات‌ها قرار می‌گیرد و دارای درجه سختی ۶ تا ۷/۵ موس است [۱۵].

۲- مواد و روشها

۲-۱- ساخت پایلوت

به‌منظور انجام پروژه تحقیقاتی نیاز به طراحی پایلوتی بود که در آن کلیه پارامترها از قبیل بار سطحی، سرعت آب ورودی و خروجی از صافی پایلوت و زمان شستشوی معکوس مشابه با شرایط عملی صافی‌های تصفیه‌خانه باشد. پایلوت مذکور به‌صورت مکعب مستطیل و با ارتفاع ۳۳۰، طول ۴۵ و عرض ۲۵سانتی‌متر و تعداد ۸ نازل طراحی و ساخته شد. با توجه به این که دبی آب خروجی از هر نازل در صافی‌های تصفیه‌خانه آب اصفهان ۰/۰۲۵ لیتر بر ثانیه بود، لذا مقدار آب خروجی از مجموع ۸ نازل موجود درصافی پایلوت نیز برابر۰/۲ لیتر بر ثانیه تنظیم گردید. محل استقرار پایلوت دقیقا در محل صافی‌های تصفیه‌خانه و در نزدیک‌ترین فاصله نسبت به صافی شاهد انتخاب شد.

۲-۲- شرایط انجام کار

صافی شماره ۲ به‌عنوان صافی شاهد انتخاب شد. آب ورودی به پایلوت و صافی شاهد یکسان بود تا مشخصات کیفی آب ورودی به پایلوت و صافی شاهد یکسان باشد. زمان شستشوی معکوس صافی پایلوت و صافی شاهد یکسان در نظر گرفته شد یعنی صافی شاهد و پایلوت همزمان شستشوی معکوس شدند. سیلیس و آنتراسیت استفاده شده در این تحقیق نیز از لحاظ تمام خصوصیات یکسان بودند به این صورت که سیلیس استفاده شده به‌عنوان بستر صافی پایلوت از بستر فیلتر شاهد جمع‌آوری و به بستر فیلتر پایلوت اضافه شد و به‌همین دلیل کلیه خصوصیات بستر فیلتر پایلوت مانند اندازه مؤثر، ضریب یکنواختی و عمر کارکرد مشابه بستر صافی پایلوت بود.

۲-۳- مراحل و روشهای انجام کار

این تحقیق در سه مرحله انجام شد. در هر مرحله ابتدا نمونه‌برداری‌های لازم با روش استاندارد و حجم مورد نیاز انجام گرفت و کدورت آب ورودی و آب خروجی از صافی پایلوت و صافی شاهد و همچنین صافی‌های استریم ۱ و ۲ فاز اول تصفیه‌خانه آب اصفهان که هر کدام دارای ۱۰صافی دو لایه‌ای بودند، اندازه‌گیری شد. نتایج با استفاده از نرم‌افزار آماری SPSS وآزمون‌های دانکن[3] و T با یکدیگر مقایسه شدند. در هر مرحله در صورت مشاهده اختلاف معنی‌دار، آزمایش‌های بیولوژی شمارش تعداد دیاتومه، جلبک، روتیفر و نماتد نیز انجام شد.

لایه‌بندی بستر صافی شاهد، درتمام مراحل همان لایه‌بندی بستر صافی‌های تصفیه‌خانه آب اصفهان بود. به این صورت که از کف ۸۰ سانتی‌متر سیلیس و۴۰ سانتی‌متر آنتراسیت پر شد. لایه‌بندی بستر صافی پایلوت و شرایط شستشوی معکوس نیز در هر مرحله به‌شرح زیر بود: در مرحله اول از کف ۷/۵ سانتی‌متر گارنت، ۶۷/۵ سانتی‌متر سیلیس و۴۰ سانتی‌متر آنتراسیت در نظر گرفته شد. لایه‌بندی بستر سیلیس در صافی پایلوت دراین مرحله به‌صورت تجربی و روش سعی و خطا و با معادل‌سازی حاصل ضرب وزن مخصوص سیلیس در ارتفاع لایه در نظر گرفته شد و ارتفاع لایه آنتراسیت نسبت به صافی‌های تصفیه‌خانه آب تغییر داده نشد. شرایط شستشوی معکوس دراین مرحله نیز برای صافی پایلوت و صافی شاهد مانند شرایط شستشوی معکوس تصفیه‌خانه آب اصفهان به‌صورت استفاده ازآب و هوا بود. در مرحله دوم، لایه‌بندی انتخاب شده بر اساس لایه‌بندی‌های موجود در جدیدترین مراجع انجام شد به این صورت که از کف ۷/۵ سانتی‌متر گارنت، ۲۲/۵سانتی‌متر سیلیس و۴۵ سانتی‌متر آنتراسیت قرار داشت [۱۶ و ۱۷]. شرایط شستشوی معکوس در این مرحله نیز برای صافی پایلوت و صافی شاهد مانند شرایط شستشوی معکوس تصفیه‌خانه آب اصفهان به‌صورت استفاده ازآب و هوا بود. لایه‌بندی انتخاب شده در مرحله سوم مانند مرحله دوم بود. در مرحله سوم شرایط شستشوی معکوس برای صافی پایلوت مانند شرایط شستشوی معکوس در تصفیه‌خانه آب اصفهان به‌صورت استفاده

[1] Garnet
[2] Grenatos
[3] Dunkan

جدول ۱- مقایسه دانه‌بندی و جنس مواد و شرایط شستشوی معکوس در صافی‌های تحقیق

نوع صافی	نوع دانه	ارتفاع (سانتی‌متر)	اندازه مؤثر دانه‌ها (میلی‌متر)	ضریب یکنواختی	نوع شستشوی معکوس
صافی شاهد (فیلترشماره۲) و	آنتراسیت	۴۰	۰/۴۷	۲/۶۲	
فیلترهای استریم ۱و۲ دو لایه (هر سه مرحله)	سیلیس	۸۰	۰/۶۳	۱/۹۰	استفاده از سیستم آب و هوا
پایلوت سه لایه(مرحله اول)	آنتراسیت	۴۰	۰/۴۷	۲/۶۲	
	سیلیس	۶۷/۵	۰/۶۳	۱/۹۰	استفاده از سیستم آب و هوا
	گارنت	۷/۵	۰/۳۴	۲/۱	
پایلوت سه لایه (مرحله دوم)	آنتراسیت	۴۵	۰/۴۷	۲/۶۲	
	سیلیس	۲۲/۵	۰/۶۳	۱/۹۰	استفاده از سیستم آب و هوا
	گارنت	۷/۵	۰/۳۴	۲/۱	
پایلوت سه لایه (مرحله سوم)	آنتراسیت	۴۵	۰/۴۷	۲/۶۲	
	سیلیس	۲۲/۵	۰/۶۳	۱/۹۰	استفاده از سیستم هوا
	گارنت	۷/۵	۰/۳۴	۲/۱	

ازآب و هوا بود ولی به‌منظور بررسی امکان حذف هوا در سیستم شستشوی معکوس و به‌دست آوردن نتایج جدید علمی و عملی در ارتباط با بررسی امکان حذف هوا، صافی شاهد فقط با استفاده ازآب، شستشوی معکوس شد و هوا حذف گردید.

در جدول ۱ خصوصیات بستر صافی‌های مورد مطالعه آورده شده است. جرم حجمی سیلیس، آنتراسیت و گارنت به‌ترتیب برابر ۲/۶ ، ۱/۵۵ و ۳/۹۵ بود. سیلیس و آنتراسیت مورد استفاده در صافی پایلوت در تمام مراحل از بستر فیلتر شماره ۲ یعنی شاهد تأمین شد. گارنت استفاده شده از منطقه ازندریان همدان تهیه شد.

۲-۴- روشهای اندازه‌گیری و دستگاهها و لوازم مورد نیاز

کلیه آزمایش‌ها در محل آزمایشگاه آب تصفیه‌خانه آب اصفهان بر طبق دستورالعمل‌های اخذ شده از کتاب روشهای استاندارد آزمایش‌های آب و فاضلاب انجام شد[۱۸].دستگاههای مورد استفاده در این تحقیق شامل دستگاه کدورت سنج هچ[1] مدل ۲۱۰۰P و معرفها و استانداردهای لازم برای انجام آزمایش کدورت، تجهیزات مورد نیاز برای انجام آزمون‌های بیولوژیکی و میکروسکوپ دو چشمی بود.

۳- نتایج و بحث

در مراحل انجام تحقیق ممکن بود مقادیر کدورت، دیاتومه، جلبک، روتیفر و نماتد آب ورودی به هریک از چهار گروه شامل پایلوت، صافی شاهد وصافی‌های استریم ۱ و ۲ فاز اول تصفیه‌خانه آب اصفهان متفاوت باشند. به‌منظور بررسی آماری یکسان و یا غیر یکسان بودن مقادیر مذکور در آب ورودی، با استفاده از آزمون‌های آماری در هر مرحله به‌طور جداگانه مقدار Pvalue محاسبه شد و در تمام مراحل بیشتر از ۰/۰۵به‌دست آمد که نشان دهنده عدم وجود اختلاف معنی‌دار و یکسان بودن خصوصیات آب خام بود (جدول ۲).

[1] Hach

جدول ۲- نتایج آزمون آنالیز واریانس یک‌طرفه مربوط به مشخصات کیفی آب ورودی

مرحله	پارامتر اندازه‌گیری شده	Pvalue	F	نتیجه گیری
اول	کدورت	۰/۹۸۴	۰/۰۵۳	در تمام مراحل و با استفاده از آزمون آنالیز واریانس مقدارPvalue بیشتر از ۰/۰۵ بوده که نشان دهنده عدم وجود اختلاف معنی دار و یکسان بودن خصوصیات آب خام بود.
دوم	کدورت	۰/۹۹۵	۰/۰۲۵	
	دیاتومه	۰/۹۷۹	۰/۰۰۱	
	روتیفر	۰/۹۶۸	۰/۰۰۲	
	جلبک	۰/۷۶۹	۰/۰۸۷	
	نماتد	۰/۹۸۹	۰/۰۰۰	
سوم	کدورت	۰/۹۲۲	۰/۱۶۲	

جدول۳- میانگین درصد حذف کدورت در چهارگروه در مرحله اول

گروه	تعداد آزمایش	راندمان (درصد حذف)			انحراف معیار	نتیجه‌گیری
		حداقل	حداکثر	میانگین		
کنترل	۳۰	۷۸	۹۹	۹۵/۳	۰/۰۴	b*
پایلوت	۳۰	۶۹	۹۷	۹۱/۳	۰/۰۶	a
استریم۱	۳۰	۷۰	۹۹	۹۵/۲	۰/۰۶	b
استریم۲	۳۰	۷۴	۹۹	۹۵/۵	۰/۰۵	b

* وجود حروف مشترک در نتیجه‌گیری نمایانگر عدم وجود اختلاف معنی‌دار و وجود حروف غیر مشترک در بالای هر یک از ستون‌ها نمایانگر وجود اختلاف معنی‌دار در هر یک از گروههاست. به گروه پایلوت که دارای کمترین میانگین درصد حذف کدورت است حرف a نمایانگر وجود اختلاف معنی‌دار و به سایر گروهها که با یکدیگر اختلاف معنی‌داری نشان نداده‌اند حرف مشترک b تعلق گرفته است.

۳-۱- نتایج مرحله اول

میانگین درصد حذف کدورت در هر یک از صافی‌های شاهد، پایلوت و صافی‌های استریم ۱ و ۲ فاز اول تصفیه‌خانه آب اصفهان، براساس شرایط مندرج در جدول ۱ با یکدیگر مقایسه و مشخص گردید که درصد حذف کدورت در گروه پایلوت به‌طور معنی‌داری از سه گروه دیگر کمتر بوده اما سه گروه دیگر با هم تفاوت معنی‌داری ندارند. به‌همین دلیل در مرحله اول، آزمون‌های بیولوژیکی انجام نشد. نتایج این مرحله نشان داد که لایه‌بندی استفاده شده بر اساس تجربه واستفاده از روش سعی و خطا، در حذف کدورت کارایی خوبی ندارد و لازم است در مرحله بعدی تحقیق لایه‌بندی بستر صافی پایلوت را تغییر داده شود. نتایج در جدول ۳ آورده شده است.

۳-۲- نتایج مرحله دوم

در این مرحله لایه‌بندی بر اساس لایه‌بندی‌های موجود در جدیدترین مراجع انتخاب شد [۱۶ و ۱۷]. از کف ۷/۵ سانتی‌متر گارنت، ۲۲/۵سانتی‌مترسیلیس و ۴۵ سانتی‌متر آنتراسیت طراحی شد و مانند مرحله ۱، آزمون‌های مربوط به اندازه‌گیری کدورت انجام گرفت. شرایط شستشوی معکوس دراین مرحله نیز برای صافی پایلوت و صافی شاهد مانند شرایط شستشوی معکوس تصفیه‌خانه آب اصفهان به‌صورت استفاده ازآب و هوا بود. نتایج به‌دست آمده در جدول ۴ آورده شده است. نتیجه‌گیری از جدول ۴ و آزمون‌های آماری نشان داد که درصد حذف کدورت در گروه پایلوت به‌طور معنی‌داری بیشتر از سه گروه دیگر بود اما سه گروه دیگر با هم تفاوت معنی‌داری نشان ندادند. در این مرحله با استفاده از نتایج به‌دست آمده مشخص شد که فیلتر پایلوت با این لایه‌بندی، کارایی بهتری نسبت به سه گروه دیگر از خود نشان می‌دهد لذا دراین مرحله آزمون‌های بیولوژیکی نیز انجام شد. به‌منظور انجام آزمون‌های بیولوژیکی، نمونه آب ورودی و خروجی هر کدام از صافی‌های کنترل و پایلوت بر اساس شرایط و مشخصات مندرج در جدول ۱ برداشته شد. سپس با استفاده از روش استاندارد برای انجام آزمون‌های بیولوژیکی شمارش تعداد در لیتر دیاتومه، جلبک، روتیفر و نماتد در آب ورودی و خروجی هر کدام از صافی‌های کنترل و پایلوت انجام شد و درصد حذف هر یک جداگانه توسط آزمون T مقایسه گردید. نتایج نشان داد صافی پایلوت سه لایه‌ای استفاده شده در این مرحله برتری بسیار خوبی نسبت به صافی دو لایه‌ای شاهد در حذف دیاتومه، جلبک، روتیفر و نماتد داشت.

نتایج این مرحله از تحقیق نشان داد که کارایی حذف کدورت، دیاتومه، جلبک، روتیفر و نماتد در شرایط لایه‌بندی مطلوب و استفاده از سیستم شستشوی معکوس با استفاده از آب و هوا در صافی پایلوت به‌ترتیب ۹۲/۴، ۹۷/۶،۹۷/۸ ، ۹۴/۴ و ۹۶/۵ درصد و صافی شاهد دو لایه‌ای به ترتیب ۸۸/۸، ۸۵/۲، ۸۶/۷، ۸۰/۵ و ۷۲/۱ درصد بود. این نتایج برتری استفاده از صافی سه لایه‌ای نسبت به صافی دو لایه‌ای در حذف کدورت، دیاتومه ،جلبک، روتیفرونماتد را نشان می‌دهد (جدول ۵).

۳-۳- نتایج مرحله سوم

در این مرحله لایه‌بندی انتخاب شده مانند مرحله دوم و شرایط شستشوی معکوس برای صافی پایلوت مانند شرایط شستشوی معکوس تصفیه‌خانه آب اصفهان به‌صورت استفاده ازآب و هوا بود. ولی به‌منظور بررسی امکان حذف هوا در سیستم شستشوی معکوس و به‌دست آوردن نتایج جدید علمی و عملی در ارتباط با بررسی امکان حذف هوا، صافی شاهد فقط با استفاده ازآب شستشوی معکوس شد وهوا حذف گردید.

در این مرحله نیز مانند مراحل قبلی ابتدا میانگین درصد حذف کدورت در هر یک از صافی‌های کنترل، پایلوت و صافی‌های استریم ۱و۲ فاز اول تصفیه‌خانه آب اصفهان بر اساس شرایط مندرج در جدول ۱ از طریق اندازه‌گیری کدورت آب ورودی

وخروجی هر کدام از صافی‌ها به روش استاندارد به دست آمد. سپس نتایج از لحاظ آماری با یکدیگر مقایسه و مشخص شد که میانگین درصد حذف کدورت در هر یک از صافی‌های کنترل، پایلوت و صافی‌های استریم ۱و ۲ فاز اول تصفیه‌خانه آب اصفهان به‌ترتیب ۹۸/۴ ،۹۸/۶،۹۶/۹ و۹۸/۶ بود. نتایج نشان داد که درصد حذف کدورت در گروه پایلوت به‌طور معنی‌داری از سه گروه دیگر کمتر بود، اما سه گروه دیگر با هم تفاوت معناداری نداشتند ($P<0.05$). به‌همین دلیل در این مرحله مانند مرحله اول، آزمون‌های بیولوژیکی انجام نشد (جدول ۶).

نتایج به‌دست آمده از این تحقیق در خصوص کارایی حذف نماتدها در فرایند فیلتراسیون مستقیم نشان داد که متوسط کارایی حذف نماتدهای فعال توسط صافی‌های تک لایه ۶۸/۸ درصد و سه لایه ۷۳/۹ درصد بود. بر اساس مطالعات میکروسکوپی عمده‌ترین علت پایین بودن کارایی حذف نماتدها قدرت حرکت آنهاست. متوسط کارایی حذف در صافی‌های تک لایه به ۹۳/۷ درصد و سه لایه به ۹۵/۸ درصد افزایش می‌یابد که بالاتر بودن کارایی حذف نماتد در صافی سه لایه‌ای نسبت به صافی دو لایه‌ای را نشان می‌دهد [۱۹].

نتیجه به‌دست آمده در تحقیق حاضر نیز، افزایش متوسط حذف نماتد در صافی سه لایه‌ای را تأیید نمود.

جدول ۴- میانگین درصد حذف کدورت در چهارگروه در مرحله دوم

گروه	تعداد آزمایش	راندمان(درصد حذف)			انحراف معیار	نتیجه‌گیری
		حداقل	حداکثر	میانگین		
کنترل	۳۳	۶۹	۹۸	۸۸/۸	۰/۰۷	ab
پایلوت	۳۳	۷۹	۹۸	۹۲/۴	۰/۰۵	a
استریم۱	۲۷	۵۸	۹۸	۸۷/۱	۰/۰۹	b
استریم۲	۳۲	۵۹	۹۸	۸۵/۹	۰/۱	b

جدول ۵- موجودات بیولوژیکی در دو گروه در مرحله دوم

گروه	پارامتر اندازه‌گیری شده	تعداد آزمایش	راندمان(درصد حذف)			انحراف معیار	نتیجه گیری
			حداقل	حداکثر	میانگین		
کنترل	دیاتومه	۲۹	۲۹	۱۰۰	۸۵/۲	۰/۱۹	a
پایلوت		۲۹	۸۴	۱۰۰	۹۷/۸	۰/۰۳	b
کنترل	جلبک	۲۹	۴۳	۱۰۰	۸۶/۷	۰/۱۶	a
پایلوت		۲۹	۹۳	۱۰۰	۹۷،۶	۰،۰۲	b
کنترل	روتیفر	۲۹	۰	۱۰۰	۸۰/۵	۰/۲۵	a
پایلوت		۲۹	۲۰	۱۰۰	۹۴/۴	۰/۱۵	b
کنترل	نماتد	۲۹	۲۰	۱۰۰	۷۲/۱	۰،۲۴	a
پایلوت		۲۹	۷۲	۱۰۰	۹۶/۵	۰/۰۶	b

جدول ۶- میانگین درصد حذف کدورت در چهارگروه در مرحله سوم

گروه	تعداد آزمایش	راندمان(درصد حذف)			انحراف معیار	نتیجه‌گیری
		حداقل	حداکثر	میانگین		
کنترل	۲۲	۹۷	۹۹	۹۸/۴	۰/۰۰۶	b
پایلوت	۲۲	۹۳	۹۸	۹۶/۶	۰/۰۱	a
استریم۱	۲۱	۹۸	۹۹	۹۸/۶	۰/۰۰۳	b
استریم۲	۲۱	۹۸	۹۹	۹۸/۶	۰/۰۰۳	b

در سال ۱۳۸۳ در دانشگاه علوم پزشکی کردستان تحقیقی در زمینه بررسی کارایی و تأثیر فیلترهای چند بستری در حذف عوامل بیماری‌زا و تأثیر آن در کاهش کلر مورد نیاز برای گندزدایی انجام شد. نتایج نشان داد که راندمان حذف کلیفرم و کلیفرم مدفوعی و نماتد به‌عنوان عوامل پاتوژن در صافی سه لایه بیشتر از صافی دو لایه است [۸].

نتایج ارائه شده در مجله انجمن کارهای آبی امریکا (AWWA) در مورد حذف متوسط *کریپتوسپوریدیم* و *ژیاردیا* افزایش لگاریتمی درصد حذف در صافی چند لایه‌ای نسبت به صافی تک لایه‌ای را به‌ترتیب از ۲/۷ به ۳/۷ و از ۳/۱ به ۳/۵ برابر نشان داده است [۹]. نتایج مشابهی نیز در همین ارتباط در سایر مقالات علمی خارجی به چاپ رسیده است که برتری کارایی حذف *کریپتوسپوریدیم* و *ژیاردیا* در صافی سه لایه‌ای را نسبت به صافی دو یا تک لایه‌ای نشان می‌دهد [۱۰، ۲۰، ۲۱ و ۲۲].

در مورد برتری کارایی حذف کدورت و حذف ذرات معلق و TOC در صافی سه لایه‌ای نسبت به صافی دو یا تک لایه‌ای نیز نتایج مشابه این تحقیق در مقالات معتبر علمی داخلی و خارجی آمده است که همگی نشان دهنده بالاتر بودن راندمان حذف کدورت و سایر ذرات معلق در صافی سه لایه‌ای نسبت به صافی دو یا تک لایه‌ای است [۱۹ و ۲۳].

۴- نتیجه‌گیری

با توجه به اینکه در طول مدت تحقیق، کلیه آزمایش‌ها با استفاده از کتاب روشهای استاندارد آزمایش‌های آب و فاضلاب انجام شد و نتایج به‌دست آمده نیز با استفاده از آزمون‌های آماری و علمی مورد بررسی قرار گرفت، از اجرای این تحقیق می‌توان موارد زیر را نتیجه‌گیری نمود:

۱- در طراحی اولیه صافی‌های چند لایه باید دقت کافی شود و لایه‌بندی مناسب از نظر ارتفاع بهینه هر یک از بسترها با توجه به منابع علمی معتبر انتخاب و مورد استفاده قرار گیرد.

۲- نتایج تحقیق نشان می‌دهد شستشوی معکوس با استفاده از آب و هوا کارایی بهتری نسبت به شستشوی معکوس تنها با استفاده از آب دارد.

۳- کارایی حذف کدورت، دیاتومه، جلبک، روتیفر و نماتد در شرایط لایه‌بندی مطلوب و استفاده از سیستم شستشوی معکوس با استفاده از آب و هوا در صافی پایلوت به‌ترتیب ۹۲/۴، ۹۷/۶،۹۷/۸ ، ۹۴/۴و ۹۶/۵ درصد و صافی شاهد دو لایه‌ای به ترتیب ۸۸/۸، ۸۵/۲، ۸۶/۷، ۸۰/۵ و ۷۲/۱ درصد بود که نشان دهنده برتری غیر قابل انکار کارایی استفاده از صافی سه لایه‌ای نسبت به صافی دو لایه‌ای در حذف پارامترهای مورد سنجش است.

۵- پیشنهادات

۱- لازم است شرکتهای آب و فاضلاب، مهندسان مشاور و سازندگان تأسیسات تصفیه‌خانه‌های آب، توجه کافی به استفاده از این گونه صافی‌ها به‌منظور تولید آب با کیفیت بهتر را مد نظر قرار دهند.

۲- پیشنهاد می‌شود یک یا دو صافی از۴۸ صافی دو لایه‌ای درحال بهره‌برداری تصفیه‌خانه آب اصفهان با استفاده از لایه‌بندی به‌دست آمده در مرحله دوم این تحقیق با استفاده از کانی گارنت به صافی سه لایه‌ای تبدیل و نتایج حاصل با نتایج به‌دست آمده در طول انجام تحقیق مقایسه شود و در صورت کسب نتایج مشابه، کلیه صافی‌های تصفیه‌خانه آب اصفهان، سه لایه‌ای شده و به‌عنوان اولین تصفیه‌خانه آب دارای صافی سه لایه‌ای، سرآمد سایر تصفیه‌خانه‌های آب در ارائه آب شرب با کیفیت عالی و ممتاز در کشور باشد.

۶- قدردانی

به‌این وسیله از شرکت آب و فاضلاب استان اصفهان به‌خاطر حمایت‌های مالی طرح و همچنین از آقایان مهندس سید حسین مرتضوی معاونت محترم بهره‌برداری و مهندس سید حسین مصطفوی مدیر تصفیه‌خانه آب اصفهان و آقایان مهندس علیرضا سلیمانی، مهندس سید علی حسینی، مهندس غلامحسین مهرپور، مهندس رضا کولیوند و آقای حسین سلیمی و کلیه همکاران شاغل در واحد صافی‌های تصفیه‌خانه آب اصفهان که در انجام این تحقیق با نویسندگان مقاله کمال همکاری و مشارکت را نموده‌اند، صمیمانه تقدیر و تشکر می‌گردد.

۷- مراجع

۱- ترابیان، ع.، رازقی، ن.، و کافی بجستانی، ح. (۱۳۸۰). "مقایسه صافی‌های تک لایه و دو لایه و سه لایه در تصفیه آب." *مجله آب و فاضلاب*، ۳۷، ۲۴-۳۰.

۲- شاه‌منصوری، م. ر.، بینا، ب.، و رضائی، ر. (۱۳۷۵). "مقایسه بررسی کارایی صافی کند ماسه‌ای در حذف کلیفرم‌ها و مواد آلی." *مجله آب و فاضلاب* ، ۱۸، ۲۲-۲۶.

۳- ترابیان، ع.، و کافی بجستانی، ح. (۱۳۸۰). "مقایسه کارایی صافی‌های تک لایه و دو لایه در فیلتراسیون مستقیم." *مجله آب و فاضلاب*، شماره ۴۰، ۲۴-۳۲.

4- Anon. (2002). *Standard 61 approved for drinking water and NSF Standard 50 approved for swimming pools*, AWWA Standard B100-01, NSF Standard 61, USA.

۵- آلای، ر.ا. (۱۳۸۱). *کیفیت آبها*، مترجم: بهروز اکبری و همکاران، انتشارات شرکت آب و فاضلاب استان اصفهان، تصفیه‌خانه آب اصفهان.

۶- انجمن کارهای آبی امریکا. (۱۳۸۱). *تصفیه آب*، مترجم: ولی علیپور و ادریس بذر افشان، انتشارات دانش نما، تهران.

7- Antonio, R. G., Winn., R. E., and Taylor, J. P. (1985). "A water born outbreak of *cryptosporidiosis* in north hosts." *Annual of Internal Medicine*, 103, 886-888.

۸- ناصری، س.، محوی، ا.ح.، صمد محمدی، ع.، روشنی، ب.، فیروز منش، م.، و صالحی، ر. (۱۳۸۳). "بررسی فیلترهای چند بستری در حذف پاتوژن‌ها از فاضلاب شهری به‌منظور استفاده مجدد و کاهش کلر جهت گندزدایی." *مجله علمی دانشگاه علوم پزشکی کردستان*، (۴) ۳۲، ۸-۱۶.

9- Ongerth, J. E., and Pecoraro, J. (1995). "Removing *cryptosporidium* using multimedia filters." *Journal AWWA*, 87, 83-89.

10- Bellamy, W.D., Silverman, G.P., Hendricks, D. W., and Logsdon, G. S. (1985). "Removing *Giardia* Cysts with slow sand filteration." *J. AWWA*, 77 (2), 52-52.

۱۱- رشیدی مهرآبادی، ع.، رازقی، ن.، عظیمی، ع. ا.، موبدی، ا.، و ترابیان، ع. (۱۳۸۳). "اثر بلوغ اولیه صافی روی بازده حذف کیست *ژیاردیا* و ارائه روشی برای بهبود." *مجله محیط شناسی*، ۳۰(۳۳)،۲۱-۲۸

12-Harris, P. (2000). "At the cutting edge-abrasives and their markets." *Industial Minerals*, 388, 19-27 .

13- Kendal, T. (1997). "Garnet-Nice work if you can get it." *Industrial Minerals*, 354, 31-41 .

14-Smyth, J. (2007). *Mineral Structure Data*,University of Colorado, USA.

۱۵- بوهن، هـ .ل. (۱۳۸۶). *شیمی خاک*، مترجم : حسام مجللی، مرکز نشر دانشگاهی، تهران.

16-Qasim, S. R., Motley, E. M., and Zhu, G. (2006).*Water works engineering. planning, design and Operation*, Prentice Hall PRT, New Jetsy.

17- Kawamura, S. (2006). *Integrated design and operation of water treatment facilities*, 2nd Ed., John Willey and Sons, N.Y.

18-Greenberg, A. D. E. (2005). *Standard methods for the examination of water and wastewater*, APHA., AWWA. and WEF., USA.

۱۹- رشیدی مهرآبادی، ع.، و ترابیان، ع. (۱۳۸۵). "بررسی کارایی فرایند فیلتراسیون مستقیم در حذف نماتدهای آزادزی از آب." *مجله محیط شناسی*، ۳۹، ۷۵-۸۲.

20- Aboytes, R., Giovanni, D. I., Abram, F. A., and Rheinecker, C. (2004). "Detection of infectious *cryptosporidium* in filtered drinking water." *J. AWWA*, 96 (9), 88-98.

21-Elmelko, M. B. (2003). "Removal of viable and inactivated *Cryptosporidium* by dual-and tri-media filtration." *Water Research*, 37 (1-2), 2998-3008.

22-Menge, J. G., Haarohoff, J., and Konig, E. (2001). "Occurrence and removal of *giardia* and *cryptosporidium* at the goreangab reclamation plant." *Water Science and Technology: Water Supply*, 1(1), 97-105.

۲۳- سلمانی خاص، ن.، و نبی بیدهندی، ع. ر. (۱۳۸۶). "ارزیابی کارایی واحدهای مختلف یکی از تصفیه‌خانه‌های شرق تهران در حذف TOC و ارائه راه حلهای مناسب." *مجله پژوهشهای محیط زیست*، ۴۱، ۱-۴.